

การศึกษาพารามิเตอร์ในการสังเคราะห์นิกเกิลนาโนเซนสำหรับตัวดูดซับแสงอาทิตย์แบบเซอร์เมทโดย
วิธีเคมีคอลลีดักชัน



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2562
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Parametric Study on the Synthesis of Ni Nanochains for Cermet Selective Solar
Absorbers by Chemical Reduction Method



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Chemical Engineering
Department of Chemical Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2019
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาพารามิเตอร์ในการสังเคราะห์นิกเกิลนาโนเซนสำหรับตัวดูดซับแสงอาทิตย์แบบเซอร์เมทโดยวิธีเคมีคอลลีตักชัน
โดย	น.ส.ปิญาราชย์ ศรีมาลา
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปารวี วาศน์อำนวย
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร.ธันยกร เมืองนาโพธิ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย อนุญาติให้บัณฑิตวิทยาลัย อนุญาติให้บัณฑิตวิทยาลัย อนุญาติให้บัณฑิตวิทยาลัย เป็นส่วนหนึ่งของ การศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สีรุ้ง ปรีชานนท์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปารวี วาศน์อำนวย)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ดร.ธันยกร เมืองนาโพธิ์)

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.ชลิตา คล้ายโสม)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.คมสันต์ สุทธิสินทอง)

ปัญหาราชาย์ ศรีมาลา : การศึกษาพารามิเตอร์ในการสังเคราะห์นิกเกิลนาโนเชนสำหรับตัวดูดซับแสงอาทิตย์แบบเซอร์เมทโดยวิธีเคมีคอลรีดักชัน. (Parametric Study on the Synthesis of Ni Nanochains for Cermet Selective Solar Absorbers by Chemical Reduction Method) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ผศ. ดร.ปารวี วาศน์อำนวย, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ดร.ฉันทกร เมืองนาโพธิ์

ในปัจจุบันการขาดแคลนพลังงานเชื้อเพลิงเป็นปัญหาที่ทั่วโลกกำลังให้ความสนใจ และเพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าวจึงเกิดการพัฒนาด้านพลังงานทดแทนในช่วงหลายปีที่ผ่านมา อาทิเช่น พลังงานจากแสงอาทิตย์ โดยพลังงานแสงอาทิตย์นั้นสามารถเปลี่ยนเป็นพลังงานรูปแบบอื่นๆได้ เช่น พลังงานความร้อน ซึ่งต้องอาศัยตัวดูดซับพลังงานแสงอาทิตย์ (SSA) ในระบบรวมแสง (CSP) โดยตัวดูดซับพลังงานแสงอาทิตย์ที่ดีจะต้องพิจารณาจากค่าการดูดกลืนแสงอาทิตย์ ค่าการแผ่รังสีความร้อน และค่าการนำความร้อน ซึ่งเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงทางสัณฐานวิทยาและโครงสร้างของอนุภาคนาโนภายในตัวดูดซับพลังงานแสงอาทิตย์ ดังนั้นในงานนี้จึงเป็นการศึกษาปัจจัยดังกล่าว โดยสังเคราะห์อนุภาคนาโนนิกเกิลจากปฏิกิริยารีดักชันของนิกเกิลคลอไรด์ (NiCl_2) ในตัวทำละลายเอทิลีนไกลคอล (EG) ซึ่งใช้ไฮดราซีนเป็นตัวรีดิวซ์ (N_2H_4) และ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เป็นตัวปรับ pH โดยปรับอัตราส่วนของ $[\text{NaOH}]/[\text{NiCl}_2]$ ตั้งแต่ 4-20 จากนั้นจึงนำมาผสมกับสารละลายอะลูมินา และขึ้นรูปเป็นฟิล์มนิกเกิลนาโนเชน-อะลูมินา ($\text{Ni nanochain-Al}_2\text{O}_3$) โดยอาศัยเทคนิค Convective deposition สำหรับการศึกษาคูโครงสร้างและสัณฐานวิทยาของอนุภาคนาโนนิกเกิลและฟิล์มนิกเกิลนาโนเชน-อะลูมินา ใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ตามลำดับความสามารถในการแผ่รังสีความร้อนของฟิล์มศึกษาโดยใช้เครื่องวัดค่าการเปล่งรังสี (Emissometer) และการสะท้อนแสงของฟิล์มศึกษาโดยใช้เทคนิค UV-Vis-NIR spectrophotometer นอกจากนี้ยังทดสอบการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของฟิล์มเมื่ออยู่ภายใต้สภาวะการจำลองของแสงอาทิตย์จากการใช้เทอร์โมคัปเปิลวัดที่พื้นผิวด้านบนของฟิล์มที่เวลาต่างๆ จากผลการทดลอง พบว่าเมื่ออัตราส่วนการเตรียม $[\text{NaOH}]/[\text{NiCl}_2]$ เพิ่มขึ้น ส่งผลให้อนุภาคนิกเกิลต่อกันเป็นสายโซ่ที่ยาวมากขึ้น และที่อัตราส่วนเท่ากับ 8 เกิดการก่อตัวของโซ่ยาวที่สุด แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนที่มากกว่านั้น ลักษณะสายโซ่กลับรวมตัวกันเป็นก้อนคล้ายทรงกลม ดังนั้นที่อัตราส่วนเท่ากับ 8 จึงมีประสิทธิภาพสูงสุดที่มีค่าการดูดซับพลังงานแสงอาทิตย์ 0.816 ± 0.019 ค่าการแผ่รังสีความร้อน 0.746 ± 0.004 และค่าการนำความร้อน $0.0061 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ ซึ่งเหมาะสำหรับการใช้งานเป็นการดูดซับด้วยพลังงานแสงอาทิตย์

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี

ปีการศึกษา 2562

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

6070243321 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORD:

Piyarach Srimara : Parametric Study on the Synthesis of Ni Nanochains for Cermet Selective Solar Absorbers by Chemical Reduction Method. Advisor: Asst. Prof. Paravee Vas-Umnuay, Ph.D. Co-advisor: Tanyakorn Muangnapoh, Ph.D.

Nowadays, energy shortage issue is one of the problems that people around the world are facing. To solve this problem, many alternative energies have been continuously developing for many years, including solar energy. Solar energy can be converted into other forms of energy such as thermal energy by using a selective solar absorber (SSA) in a concentrating solar power (CSP) system. The performance of a SSA material is required to have high solar absorptance, low thermal emittance and high thermal conductivity. These properties are influenced by the morphology and structure of nanoparticles formed as a SSA. Therefore, in this work we studied the synthesis of Ni nanochains via a chemical reduction using nickel chloride as a precursor dissolved in ethylene glycol. Hydrazine was used as a reducing agent and sodium hydroxide solution was used to adjust pH of the solution. The investigated parameter in this study is the ratio of $[\text{NaOH}]/[\text{NiCl}_2]$ ranging from 4-20. The obtained Ni nanochains were mixed in Al_2O_3 solution and fabricated as a cermet Ni- Al_2O_3 thin film by convective deposition. The morphology and structure of Ni nanochains and films, was characterized using scanning electron microscopy (SEM) and X-ray diffraction (XRD), respectively. Emissometer was used to measure thermal emittance, UV-Vis-NIR spectrophotometer was used to measure the reflectance of the film, and thermocouple was used to measure the temperature of thin films. It was found that increasing molar ratios $[\text{NaOH}]/[\text{NiCl}_2]$ to 8 resulted in the longest chain formation. However, when the molar ratio exceeded 8, spherical-like Ni nanoparticles were observed. Moreover, at the ratio of 8 Ni nanochain- Al_2O_3 cermet film demonstrated a solar absorptance of 80.83, a thermal emittance of 0.78 and a thermal conductivity of 0.0061 W/(m·K) which is suitable as solar selective

Field of Study: Chemical Engineering

Student's Signature

Academic Year: 2019

Advisor's Signature

Co-advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างเสร็จสมบูรณ์ด้วยความกรุณาอย่างยิ่งจากอาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปารวี วาสน์อำนวย และอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ดร.ฉันทกร เมืองนาโพธิ์ ที่ได้สละเวลาอันมีค่าแก่ข้าพเจ้าในการชี้แนะแนวคิดให้คำแนะนำ และตรวจแก้ไขข้อผิดพลาดด้วยความเอาใจใส่เป็นอย่างยิ่ง ตลอดจนการให้คำปรึกษาและเป็นแรงผลักดันให้ข้าพเจ้าดำเนินการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงได้โดยสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.สิริรุ่ง ปรีชานนท์ ดร.ชลิดา คล้ายโสม และดร.คมสันต์ สุทธิสินทอง ที่ให้เกียรติเข้าร่วมเป็นคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ พร้อมทั้งให้คำแนะนำ ข้อคิดเห็น และตรวจแก้ไข ข้อผิดพลาดในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณดร.พิศิษฐ์ คำหน่อแก้ว และดร.ฉันทกร เมืองนาโพธิ์ จากทีมวิจัยนวัตกรรมเคลือบนาโน กลุ่มวิจัยวัสดุผสมและการเคลือบนาโน ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ ที่ให้การอำนวยความสะดวกเรื่องวัสดุอุปกรณ์ และสถานที่ปฏิบัติงานวิจัย ตลอดจนการให้องค์ความรู้ คำแนะนำ และสนับสนุนการใช้เครื่องมือในการวิเคราะห์

ขอขอบคุณสมาชิกพาทีเคลือบ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่มอบมิตรภาพที่ดีและความช่วยเหลือซึ่งกันและกันมาโดยตลอด สุดท้ายนี้ขอขอบคุณบิดา มารดาและครอบครัวของข้าพเจ้า ตลอดจนมิตรแท้ทุกท่านที่คอยให้การสนับสนุนและกำลังใจจนสามารถดำเนินการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จสมบูรณ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ปัญาราชย์ ศรีมาลา

สารบัญ

	หน้า
.....	ค
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญรูปภาพ.....	ญ
สารบัญตาราง.....	ท
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	6
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	6
1.3.1 เครื่องมือวิเคราะห์โครงสร้างและลักษณะทางสัณฐานวิทยาของอนุภาคนาโนนิกเกิล....	7
1.3.2 เครื่องมือวิเคราะห์คุณสมบัติฟิล์มอนุภาคนาโนนิกเกิล-อะลูมินา	7
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	8
2.1 ระบบรวมแสงอาทิตย์.....	8
2.1.1 ประเภทและส่วนประกอบของ CSPs.....	8
2.1.2 หลักการทำงาน.....	10
2.2 สมรรถนะตัวดูดซับแสงดวงอาทิตย์แบบจำเพาะ (solar selective absorber, SSA).....	10
2.3 การวัดค่าการนำความร้อนของวัสดุฟิล์มบาง (Conductivity of Thin Film Materials).....	11

2.3.1 การวัดค่าการนำความร้อนของฟิล์มบางโดยใช้วิธี Steady-State Methods แบบ Cross-Plane	12
2.3.2 การวัดค่าการนำความร้อนของฟิล์มบางโดยใช้วิธี Steady-State Methods แบบ In-Plane	13
2.4 ประเภทตัวดูดซับแสงอาทิตย์แบบจำเพาะ (solar selective absorber, SSA).....	14
2.4.1 Intrinsic.....	14
2.4.2 Semiconductor-metal tandem	15
2.4.3 Multilayer interference stacks.....	16
2.4.4 Textured surface.....	17
2.4.5 Dielectric-metal-dielectric (DMD).....	17
2.4.6 Cermet composite.....	18
2.5 วิธีการเตรียมตัวดูดซับรังสีความร้อน.....	23
2.6 อนุภาคนาโน निकเกิล	25
2.6.1 การสังเคราะห์อนุภาคนาโน निकเกิล	26
2.6.2 กลไกการเกิดสายโซ่ของอนุภาคนาโน निकเกิล.....	28
2.7 การสังเคราะห์สารละลายอะลูมินา.....	31
2.7.1 คุณสมบัติของอะลูมินาที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งานเป็นตัวดูดซับพลังงานแสงอาทิตย์	31
2.7.2 การสังเคราะห์อะลูมินาด้วยวิธีโซล - เจล	32
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	34
3.1 การสังเคราะห์อนุภาคนาโน निकเกิลโดยใช้ปฏิกิริยารีดักชัน.....	34
3.1.1 รายการสารเคมีที่ใช้สำหรับสังเคราะห์อนุภาคนาโน निकเกิล	34
3.1.2 วิธีการสังเคราะห์อนุภาคนาโน निकเกิลโดยใช้ปฏิกิริยารีดักชัน	34
3.2 การสังเคราะห์สารละลายอะลูมินาโดยวิธีโซล-เจล.....	35
3.2.1 รายการสารเคมีที่ใช้สำหรับสังเคราะห์สารละลายอะลูมินา	35

3.2.2	วิธีสังเคราะห์สารละลายอะลูมินาด้วยวิธีโซล-เจล.....	35
3.3	การขึ้นฟิล์มตัวดูดซับพลังงานแสงอาทิตย์	35
3.3.1	วิธีการเตรียมสารละลายอนุภาคนาโนนิกเกิล-อะลูมินา	35
3.3.2	วิธีการเตรียมชั้นสเตรท.....	35
3.3.3	การเตรียมฟิล์มอนุภาคนาโนนิกเกิล-อะลูมินา.....	35
3.4	เครื่องมือในการวิเคราะห์ผล.....	36
บทที่ 4	ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง	37
4.1	ผลของสัดส่วนเชิงโมลของ [NaOH]/[NiCl ₂] ที่อัตราส่วนต่างๆ	37
4.1.1	ผลการวิเคราะห์ขนาดและรูปร่างของอนุภาคนาโนนิกเกิล	37
4.1.2	ผลการวิเคราะห์กลไกการเกิดอนุภาคคล้ายสายโซ่ของอนุภาคนาโนนิกเกิล	40
4.1.3	ผลการวิเคราะห์กลไกการเกิดอนุภาคคล้ายทรงกลมของอนุภาคนาโนนิกเกิล.....	44
4.1.4	ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของอนุภาคนาโนนิกเกิล	47
4.1.5	ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของฟิล์มอนุภาคนาโนนิกเกิล-อะลูมินา.....	48
4.2	ผลของโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของอนุภาคนาโนนิกเกิลที่เหมาะสมสำหรับตัวดูดซับ พลังงานแสงอาทิตย์ (solar absorbers).....	50
4.2.1	ผลของขนาดและรูปร่างของอนุภาคนาโนนิกเกิล	51
4.2.1.1	ค่าการดูดกลืนแสง (Solar absorptance).....	51
4.2.1.2	ค่าการแผ่รังสีความร้อน (Thermal emittance)	55
4.2.1.3	ค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity).....	56
4.2.2	ผลของปริมาณอนุภาคนาโนนิกเกิล.....	60
4.2.2.1	ค่าการดูดกลืนแสง (Solar absorptance).....	60
4.2.2.2	ค่าการแผ่รังสีความร้อน (Thermal emittance)	62
4.2.2.3	ค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity).....	62
บทที่ 5	สรุปผลและอภิปราย	65

5.1 สรุปผล.....	65
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	65
ภาคผนวก ก.....	66
ภาคผนวก ก ตารางแสดงเส้นผ่านศูนย์กลาง และความยาวของอนุภาคนาโนนิกเกิล	66
ภาคผนวก ข.....	67
ภาคผนวก ข ตารางแสดงปริมาณอนุภาคนาโนนิกเกิลที่สังเคราะห์ได้ที่อัตราส่วนแตกต่างกัน	67
ภาคผนวก ค.....	68
ภาคผนวก ก ผลการทดสอบค่าการดูดกลืนแสง (Solar absorptance) ของฟิล์มอนุภาคนาโนนิกเกิล-อะลูมินา.....	68
ภาคผนวก ง.....	70
ภาคผนวก ข ผลการทดสอบค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) ของฟิล์มอนุภาคนาโนนิกเกิล-อะลูมินา.....	70
วิธีการคำนวณค่าการนำความร้อนของฟิล์มนิกเกิลนาโนเซน-อะลูมินา (Ni nanochain- Al_2O_3).....	70
บรรณานุกรม.....	73
ประวัติผู้เขียน.....	81

สารบัญรูปลูกภาพ

รูปที่ 1 การเปลี่ยนพลังงานจากแสงอาทิตย์เป็นพลังงานความร้อนและการนำไปใช้ประโยชน์อื่นๆ [2]	2
รูปที่ 2 ประเภทตัวดูดซับแสงดวงอาทิตย์แบบจำเพาะ [7].....	4
รูปที่ 3 เทคนิคการเคลือบฟิล์มบางแบบการนำพาการระเหย [11]	5
รูปที่ 4 ประเภทของ CSPs (ก) รังพาราโบลา (ข) เฟรสเนลแบบเส้นตรง (ค) จานสเตอร์ลิง และ (ง) ตัวรับตำแหน่งศูนย์กลาง [16].....	8
รูปที่ 5 หลักการทำงานตัวดูดซับรังสีดวงอาทิตย์แบบจำเพาะ (solar selective absorber, SSA) [3]	10
รูปที่ 6 ประสิทธิภาพเชิงสเปกตรัมของสเปกตรัมของดวงอาทิตย์ที่ AM 1.5 และสเปกตรัมการแผ่รังสีของวัตถุดำที่อุณหภูมิแตกต่างกัน [22]	11
รูปที่ 7 แสดงวิธีการวัดค่านำความร้อนโดยใช้วิธี Steady-State Methods สำหรับวัดค่านำความร้อนระนาบ Cross-Plane (ก) เซ็นเซอร์จะถูวางระหว่างฟิล์มและ substrate สำหรับการวัดโดยตรง (ข) เซ็นเซอร์อีกตัวจะวางอยู่ทางด้านขวางบน substrate เพื่อวัดอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของฟิล์ม [27]	13
รูปที่ 8 แสดงวิธีการวัดค่านำความร้อนโดยใช้วิธี Steady-State Methods สำหรับวัดค่านำความร้อนระนาบ In-Plane (ก) ค่าการนำความร้อนในระนาบสามารถถูกอนุมานได้จากความแตกต่างอุณหภูมิของฮีตเตอร์/เซ็นเซอร์ (ข) การวัดค่าการนำความร้อนด้วยฮีตเตอร์/เซ็นเซอร์และมีเซ็นเซอร์อุณหภูมิ [27].....	14
รูปที่ 9 ตัวดูดซับ intrinsic [28]	14
รูปที่ 10 semiconductor-metal tandem [28]	15
รูปที่ 11 multilayer interference stacks [28]	16
รูปที่ 12 textured surface [28]	17
รูปที่ 13 dielectric-metal-dielectric (DMD) [28]	18
รูปที่ 14 cermet composite [28].....	18
รูปที่ 15 แสดงสเปกตรัมการสะท้อนแสงของตัวดูดซับพลังงานแสงอาทิตย์ Ni - SiO ₂ โดยมีความหนาของฟิล์มที่ต่างกัน [52].....	20

รูปที่ 16 แสดงค่าการดูดซับพลังงานแสงอาทิตย์และค่าการปล่อยพลังงานงานความร้อนของ SSA โดยมีโลหะต่างชนิดกัน Ag, Co, Mo, Ni, Pt และ W ที่อยู่ในเมทริกซ์ Al_2O_3 [56].....	21
รูปที่ 17 แสดงวิธีการสร้างตัวดูดซับพลังงานแสงอาทิตย์แบบจำเพาะ (SSA) จากกระบวนการเตรียมสารละลาย (Solution process) [58]	24
รูปที่ 18 โครงสร้างผลึกของอนุภาคนาโนนิกเกิลโดย $[NiCl_2] = 5.0 \text{ mM}$ $[N_2H_5OH] = 0.1 \text{ M}$ [61].	27
รูปที่ 19 แสดงผลกระทบของความเข้มข้นของนิกเกิลคลอไรด์และไฮดรอกไซด์ที่มีผลต่อขนาดของนิกเกิลนาโนพาร์ติเคิล (O) $[NiCl_2] = 5.0 \text{ mM}$ $[N_2H_5OH] = 0.05-0.3 \text{ M}$; (Δ) $[NiCl_2] = 2.5-7.5 \text{ mM}$ $[N_2H_5OH] = 0.1 \text{ M}$; (\square) $[NiCl_2] = 45 \text{ mM}$ $[N_2H_5OH] = 0.9 \text{ M}$. [61].....	27
รูปที่ 20 (ก, ข) ภาพ SEM ของอนุภาคนาโนนิกเกิลที่สังเคราะห์ได้ (ค) รูปแบบ XRD ของอนุภาคนาโนนิกเกิล (ง) แสดงกราฟระหว่าง Magnetization และ strength magnetic field ของอนุภาคนาโนนิกเกิล [62].....	28
รูปที่ 21 (ก) ภาพ SEM ของสายโซ่อนุภาคนาโนนิกเกิล (ข) ภาพ TEM ของสายโซ่อนุภาคนาโนนิกเกิลและรูปแบบ nano-beam electron diffraction (NBED) ของโครงสร้างผลึกสายโซ่อนุภาคนาโนนิกเกิล [63]	29
รูปที่ 22 ภาพ SEM ของ NiNWs สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ (ก) 70 °C (ข) 110 °C (ค) 150°C และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับ (ง) ความยาว (จ) ความกว้าง (ฉ) สัดส่วนความยาวต่อความกว้าง [64]	30
รูปที่ 23 ภาพ SEM ของ NiNWs สังเคราะห์ที่เวลา (ก) 1นาทีก (ข) 10นาทีก (ค) 30นาทีก และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการเกิดปฏิกิริยากับ (ง) ความยาว (จ) ความกว้าง (ฉ) สัดส่วนความยาวต่อความกว้าง [64].....	31
รูปที่ 24 แสดงวิธีการสังเคราะห์ด้วยวิธีโซล-เจล [66].....	32
รูปที่ 25 ภาพ SEM อนุภาคนาโนนิกเกิลสังเคราะห์โดยปฏิกิริยารีดักชัน มีอัตราส่วนของ $[NaOH]/[NiCl_2]$ เท่ากับ 4 ที่เวลา 60 นาที ที่กำลังขยาย (ก) 2,000 และ (ข) 5,000	38
รูปที่ 26 ภาพ SEM อนุภาคนาโนนิกเกิลสังเคราะห์โดยปฏิกิริยารีดักชัน มีอัตราส่วนของ $[NaOH]/[NiCl_2]$ เท่ากับ 6 ที่เวลา 60 นาที ที่กำลังขยาย (ก) 2,000 และ (ข) 5,000	38
รูปที่ 27 ภาพ SEM อนุภาคนาโนนิกเกิลสังเคราะห์โดยปฏิกิริยารีดักชัน มีอัตราส่วนของ $[NaOH]/[NiCl_2]$ เท่ากับ 8 ที่เวลา 60 นาที ที่กำลังขยาย (ก) 2,000 และ (ข) 5,000	38

รูปที่ 28 ภาพ SEM ของอนุภาคนาโนนิกเกิลสังเคราะห์โดยปฏิกิริยารีดักชัน มีอัตราส่วนของ [NaOH]/[NiCl ₂] เท่ากับ 10 ที่เวลา 60 นาที ที่กำลังขยาย (ก) 2,000 และ (ข) 5,000	39
รูปที่ 29 ภาพ SEM อนุภาคนาโนนิกเกิลสังเคราะห์โดยปฏิกิริยารีดักชัน มีอัตราส่วนของ [NaOH]/[NiCl ₂] เท่ากับ 12 ที่เวลา 60 นาที ที่กำลังขยาย (ก) 2,000 และ (ข) 5,000	39
รูปที่ 30 ภาพ SEM อนุภาคนาโนนิกเกิลสังเคราะห์โดยปฏิกิริยารีดักชัน มีอัตราส่วนของ [NaOH]/[NiCl ₂] เท่ากับ 20 ที่เวลา 60 นาที ที่กำลังขยาย (ก) 2,000 และ (ข) 5,000.....	39
รูปที่ 31 ภาพ TEM ของอนุภาคนาโนนิกเกิลที่อัตราส่วนของ [NaOH]/[NiCl ₂] เท่ากับ 8 ที่เวลา (ก)10 (ข)20 (ค)30 (ง)40 (จ)50 และ (ฉ)60 นาทีตามลำดับ ที่กำลังขยาย 10,000	41
รูปที่ 32 แผนภาพแสดงขั้นตอนการก่อตัวเป็นสายโซ่ของอนุภาคนาโนนิกเกิล [62].....	42
รูปที่ 33 ภาพ TEM อนุภาคนาโนนิกเกิลที่อัตราส่วนของ [NaOH]/[NiCl ₂] เท่ากับ 8 ที่เวลา 40 นาที กำลังขยาย 25,000	43
รูปที่ 34 ภาพ SEM อนุภาคนาโนนิกเกิลสังเคราะห์โดยปฏิกิริยารีดักชัน มีอัตราส่วนของ NH ₄ OH ต่อ NiCl ₂ เท่ากับ 8 ที่เวลา 60 นาที กำลังขยาย (ก) 2,000 และ (ข) 5,000.....	44
รูปที่ 35 ภาพ TEM อนุภาคนาโนนิกเกิลที่อัตราส่วนของ [NaOH]/[NiCl ₂] เท่ากับ 20 ที่เวลา (ก) 10, (ข) 20, (ค) 30, (ง) 40, (จ) 50, (ฉ) 60 นาทีตามลำดับ ที่กำลังขยาย 10,000.....	45
รูปที่ 36 ภาพ SEM อนุภาคนาโนนิกเกิลสังเคราะห์โดยปฏิกิริยารีดักชัน มีอัตราส่วนของ NaOH ต่อ NiCl ₂ เท่ากับ (ก) 4, (ข) 6, (ค) 8, (ง) 10, (จ) 12, (ฉ) 20 ที่เวลา120 นาที กำลังขยาย 5,000.....	47
รูปที่ 37 โครงสร้างผลึกของอนุภาคนาโนนิกเกิลสังเคราะห์โดยปฏิกิริยารีดักชัน มีอัตราส่วนของ [NaOH]/[NiCl ₂] เท่ากับ (ก) 4, (ข) 8, (ค) 10, (ง) 20.....	48
รูปที่ 38 โครงสร้างผลึกของ (ก) สแตนเลสสตีล และ (ข) พิล์มอนุภาคนาโนนิกเกิล-อะลูมินา.....	49
รูปที่ 39 กราฟของ (ก) สแตนเลสสตีล และ (ข) พิล์มอนุภาคนาโนนิกเกิล-อะลูมินา.....	50
รูปที่ 40 ภาพ SEM-EDS ของฟิล์มนิกเกิลนาโนเชน-อะลูมินา (Ni nanochain – Al ₂ O ₃).....	50
รูปที่ 41แสดงสเปกตรัมการสะท้อนแสงของฟิล์มอนุภาคนาโนนิกเกิล-อะลูมินา เทียบกับสเปกตรัมพลังงานแสงอาทิตย์ AM 1.5 โดยมีอัตราส่วนของ NaOH ต่อ NiCl ₂ ที่ต่างกัน.....	52
รูปที่ 42 รูป SEM แสดงการกระจายตัวของอนุภาคนาโนนิกเกิลในฟิล์ม (ก) พิล์มอนุภาคนิกเกิล-อะลูมินา ที่อัตราส่วน [NaOH]/[NiCl ₂] = 8 (ก) พิล์มอนุภาคนาโนนิกเกิลที่อัตราส่วน [NaOH]/[NiCl ₂] = 20 (ข)	53

รูปที่ 43 รูป SEM แสดงการกระจายตัวของอนุภาคนาโนนิกเกิลในฟิล์มแบบcross-section (ก) ฟิล์มอนุภาคนิกเกิล-อะลูมินาที่อัตราส่วน $[\text{NaOH}]/[\text{NiCl}_2] = 8$ (ก) ฟิล์มอนุภาคนาโนนิกเกิลที่อัตราส่วน $[\text{NaOH}]/[\text{NiCl}_2] = 20$ (ข).....	54
รูปที่ 44 กราฟแสดงค่าการดูดกลืนแสง ค่าการแผ่รังสีความร้อน ค่า Solar selectivityที่อัตราส่วน $[\text{NaOH}]/[\text{NiCl}_2]$ แตกต่างกัน.....	55
รูปที่ 45 แสดงวิธีการทดลองเพื่อคำนวณหาค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) ของฟิล์มอนุภาคนิกเกิล-อะลูมินา	58
รูปที่ 46 กราฟแสดงผลต่างของอุณหภูมิฟิล์มอนุภาคนาโนนิกเกิล-อะลูมินา ที่อัตราส่วน $[\text{NaOH}]/[\text{NiCl}_2]$ แตกต่างกัน.....	59
รูปที่ 47 แสดงสเปกตรัมการสะท้อนแสงของฟิล์มอนุภาคนาโนนิกเกิล-อะลูมินา เทียบกับสเปกตรัมพลังงานแสงอาทิตย์ AM 1.5 โดยมีปริมาณอนุภาคนาโนนิกเกิลในอะลูมินาที่ต่างกัน.....	60
รูปที่ 48 แสดงค่าการดูดกลืนแสง, ค่าการปล่อยรังสีความร้อน และ solar selectivity โดยมีปริมาณอนุภาคนาโนนิกเกิลในอะลูมินาที่ต่างกัน	61
รูปที่ 49 กราฟแสดงผลต่างของอุณหภูมิของฟิล์มอนุภาคนาโนนิกเกิล-อะลูมินา โดยมีปริมาณนิกเกิลแตกต่างกัน.....	64
รูปที่ 50 %การสะท้อนแสงของสแตนเลส และฟิล์มอนุภาคนาโนนิกเกิล-อะลูมินา ที่อัตราส่วน $[\text{NaOH}]/[\text{NiCl}_2]$ ตั้งแต่ 4 - 20 โดยวัดจากเครื่อง UV-Vis spectroscopy	68
รูปที่ 51 การสะท้อนแสงของสแตนเลส และฟิล์มอนุภาคนาโนนิกเกิล-อะลูมินา โดยมีปริมาณอนุภาคนาโนนิกเกิลในอะลูมินาที่แตกต่างกัน โดยวัดจากเครื่อง UV-Vis spectroscopy.....	69

สารบัญตาราง

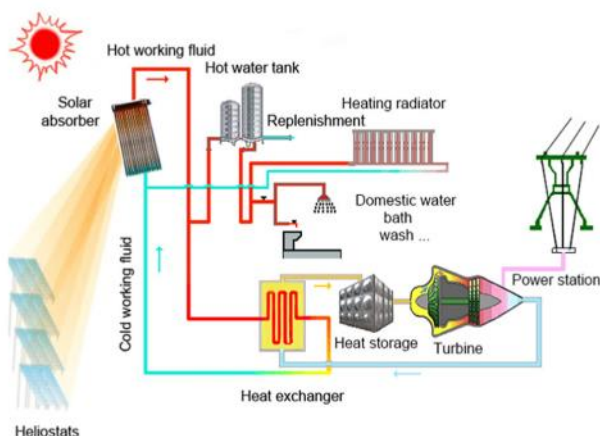
ตารางที่ 1 แสดงตัวดูดซับรังสีแสงอาทิตย์แบบจำเพาะชนิดเซอร์เมท โดยมีชนิดของเมทริกซ์, ชนิดโลหะ, ชั้นสเตรท และวิธีการเคลือบฟิล์มที่แตกต่างกัน พร้อมแสดงค่าการดูดกลืนแสง และค่าการปล่อยพลังงานความร้อน	22
ตารางที่ 2 แสดงค่าการดูดกลืนแสง, ค่าการปล่อยรังสีความร้อน และ solar selectivity ที่อัตราส่วน $[\text{NaOH}]/[\text{NiCl}_2]$ แตกต่างกัน.....	54
ตารางที่ 3 แสดงอุณหภูมิ T1, T2, ค่าเฉลี่ย ΔT ความหนาฟิล์ม และ ค่า k_f ของฟิล์มอนุภาคนาโน นิกเกิลนา-อะลูมินา ที่อัตราส่วน $[\text{NaOH}]/[\text{NiCl}_2]$ แตกต่างกัน	58
ตารางที่ 4 แสดงค่าการดูดกลืนแสง, ค่าการปล่อยรังสีความร้อน และ solar selectivity โดยมีปริมาณอนุภาคนาโนนิกเกิลในอะลูมินาที่ต่างกัน	61
ตารางที่ 5 แสดงอุณหภูมิ T1, T2, ค่าเฉลี่ย ΔT ความหนาฟิล์ม และ ค่า k_f ของฟิล์มอนุภาคนาโน นิกเกิล-อะลูมินา โดยมีปริมาณ Ni แตกต่างกัน.....	63
ตารางที่ 6 ตารางแสดงเส้นผ่านศูนย์กลาง และความยาวของอนุภาคนาโนนิกเกิล ที่อัตราส่วน.....	66
ตารางที่ 7 ตารางแสดงปริมาณอนุภาคนาโนนิกเกิลที่สังเคราะห์ได้ที่อัตราส่วนแตกต่างกัน	67
ตารางที่ 8 อุณหภูมิของฟิล์มนิกเกิลนาโนเซน-อะลูมินา T1, T3 ที่วัดทุกๆ 1 นาที ทั้งหมด 60 นาที	70

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

จากอดีตจนถึงปัจจุบันเชื้อเพลิงฟอสซิลเป็นเชื้อเพลิงหลักที่ถูกนำมาใช้ในการผลิตเป็นพลังงานอื่นๆ จึงทำให้ปริมาณฟอสซิลลดลงอย่างรวดเร็ว เป็นผลมาจากประชากรโลกที่เพิ่มสูงขึ้นและการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วของอุตสาหกรรมและเศรษฐกิจ ดังนั้นการหาแหล่งพลังงานทดแทนแหล่งใหม่จึงเป็นสิ่งสำคัญที่ทุกประเทศให้ความสนใจเพื่อนำมาทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิล (น้ำมัน ถ่านหิน ก๊าซธรรมชาติ) และเพื่อเตรียมเป็นพลังงานสำรองของประเทศ [1] แหล่งพลังงานทางเลือกต่างๆ ได้รับความสนใจเพิ่มขึ้น เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม และพลังงานความร้อนใต้พิภพ ในปัจจุบันประเทศฝั่งอเมริกา ยุโรป และเอเชีย เช่น สหรัฐอเมริกา สเปน อิตาลี และญี่ปุ่นมีความสนใจทางด้านการใช้พลังงานแสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานทดแทนเป็นอย่างมาก [2] เนื่องจากเป็นพลังงานที่ไม่มีวันหมดสิ้นและเป็นพลังงานที่สะอาด นอกจากนี้ในระหว่างกระบวนการใช้งานไม่ก่อให้เกิดมลพิษ และไม่มีผลกระทบต่อความสมดุลในระบบนิเวศน์

พลังงานแสงอาทิตย์สามารถเปลี่ยนไปเป็นพลังงานไฟฟ้าหรือพลังงานรูปแบบอื่นๆ ได้โดยตัวดูดซับแสงดวงอาทิตย์แบบจำเพาะที่อยู่ในรูปของฟิล์มบาง (solar selective absorber, SSA) [3] ซึ่งอยู่ในระบบรวมแสงอาทิตย์ (concentrating solar power plants, CSPs) [4] SSA คือฟิล์มบางในระดับไมโครเมตรอยู่บนวัสดุหนึ่งๆ โดยมีหลักการคือเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานความร้อน เมื่อมีแสงจากดวงอาทิตย์แผ่มา SSA จะดูดกลืนแสงไว้ภายใน แสงจะเกิดการเคลื่อนที่และเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน ความร้อนจะถูกส่งผ่านไปยังของเหลวที่อยู่ในระบบ CSPs โดยทั่วไป CSPs มักออกแบบให้มีของเหลวไหลผ่านเพื่อรับความร้อนและนำความร้อนนี้ไปใช้ประโยชน์ต่อไป เช่น การนำความร้อนไปหมุนกังหันเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าหรือนำความร้อนไปผลิตน้ำร้อนเพื่อใช้ในกระบวนการต่างๆ ในอุตสาหกรรม แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 การเปลี่ยนพลังงานจากแสงอาทิตย์เป็นพลังงานความร้อนและการนำไปใช้ประโยชน์อื่นๆ [2]

การดูดกลืนแสงและการแผ่รังสีของวัสดุ SSA นั้นเป็นผลมาจากกลไกต่างๆ ซึ่งขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างของวัสดุที่นำมาใช้ โดย SSA ต้องมีความสามารถในการดูดกลืนแสง (α) ได้สูงที่ความยาวคลื่นแสงอาทิตย์ ($0.3\text{-}0.5\ \mu\text{m}$) มีค่าการแผ่รังสีความร้อน (ϵ) ต่ำที่ความยาวคลื่นในช่วงรังสีอินฟราเรด ($>2.5\ \mu\text{m}$) เพื่อลดการสูญเสียความร้อน และควรมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนสูง ซึ่งเป็นค่าที่แสดงความสามารถในการถ่ายเทความร้อนด้วยการนำความร้อนของวัสดุ หรือที่เรียกกันว่า “ค่า K” มีหน่วยเป็น $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ดังนั้นวัสดุนำมาใช้เป็น SSA ควรมีค่าการดูดกลืนแสง (Solar absorptance) สูง มีค่าการแผ่รังสีความร้อน (Thermal emittance) ต่ำ และมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (thermal conductivity) สูง สามารถคำนวณได้จากสมการตามที่แสดงในสมการที่ 1 2 และ 3 [5, 6]

สมการคำนวณค่าการดูดกลืนแสง

$$\alpha = \frac{\int_{0.3\mu\text{m}}^{2.5\mu\text{m}} I_{\text{sol}}(\lambda)(1-R(\lambda))d\lambda}{\int_{3.0\mu\text{m}}^{2.5\mu\text{m}} I_{\text{sol}}(\lambda)d\lambda} \quad (1)$$

สมการคำนวณค่าการแผ่รังสีความร้อน

$$\omega_T = \frac{\int_{0.3\mu\text{m}}^{2.5\mu\text{m}} I_p(\lambda)(1-R(\lambda))d\lambda}{\int_{3.0\mu\text{m}}^{2.5\mu\text{m}} I_p(\lambda)d\lambda} \quad (2)$$

โดย

α คือ ค่าการดูดกลืนแสงอาทิตย์ของ SSA

ω_T คือ ค่าการแผ่รังสีความร้อนของ SSA

I_{sol} คือ ความเข้มแสงของรังสีดวงอาทิตย์ที่ AM (air mass) 1.5

I_p คือ ความเข้มแสงของรังสี black body ที่อุณหภูมิใดๆ

$R(\lambda)$ คือ ค่าสะท้อนแสงที่วัดได้ของ SSA ณ ความยาวคลื่นใดๆ

สมการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน

$$K_f = \frac{q \cdot L_1}{A_1 \cdot [(T_1 - T_3) - \left(\frac{q \cdot L_2}{K_{ss} \cdot A_2} \right)]} \quad (3)$$

โดย

K_f คือ ค่าการนำความร้อนของฟิล์ม W/(m·K)

q คือ พลังงานความร้อนให้แก่ฟิล์มมีค่าเท่ากับ 1000 W/m²

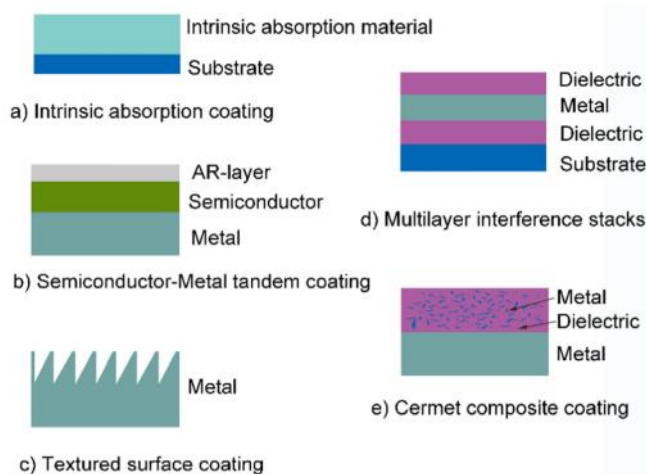
L_1, L_2 คือ ความหนาฟิล์มและความหนาสแตนเลส (m)

A_1, A_2 คือ พื้นที่ฟิล์ม (m²)

K_{ss} คือ ค่าการนำความร้อนของแผ่นสแตนเลส W/(m·K)

T_1, T_2 คือ อุณหภูมิวัดด้านบน (วัดที่ฟิล์ม) และอุณหภูมิวัดด้านล่าง วัดที่สแตนเลส (K)

จากที่กล่าวไปข้างต้นการออกแบบให้ระบบรวมแสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพสูงสุดได้นั้นต้องเลือกวัสดุที่นำมาใช้เป็น SSA ให้เหมาะสมต่อสภาวะนำไปใช้งาน โดยทั่วไปประเภทของตัวดูดซับรังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์สามารถออกแบบได้ 5 ประเภท คือ 1. intrinsic absorbing coatings 2. semiconductor-metal tandem coatings 3. textured surface coatings 4. multilayer interference stacks และ 5. cermet composite coatings แสดงดังรูปที่ 2

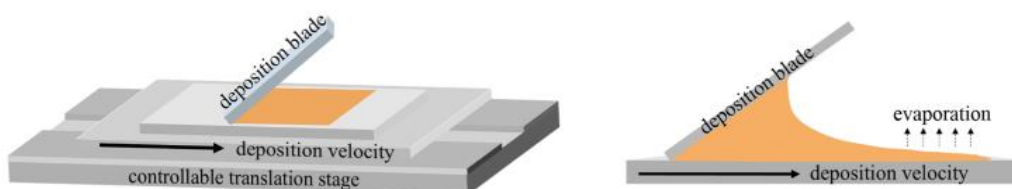


รูปที่ 2 ประเภทตัวดูดซับแสงดวงอาทิตย์แบบจำเพาะ [7]

intrinsic absorbing coatings หรือ mass absorbers คือ SSA ที่ใช้คุณสมบัติเฉพาะของวัสดุ นั้นๆ มาเป็น SSA โดยตรงส่วนมากจะเป็นพวกโลหะ W, HfC, ZrB₂, SnO₂, In₂O₃, Eu₂O₃, ReO₃, V₂O₅, และ LaB₆ จากงานวิจัยที่ผ่านมา SSA ชนิดนี้ไม่ได้รับความนิยมมากนักเนื่องจากไม่มีคุณสมบัติเพียงพอสำหรับการใช้งานจึงจำเป็นต้องได้รับการปรับปรุงให้เหมาะสมก่อนนำไปใช้ถึงจะได้ ประสิทธิภาพสูง แบบที่ 2 คือ semiconductor-metal tandem coatings เป็น SSA ที่มีความเป็นรูพรุนและดัชนีการหักเหสูงทำให้เกิดการสูญเสียแสงสะท้อนต่ำส่งผลให้ค่าการดูดกลืนแสงสูงเหมาะสำหรับหรับการใช้งานตั้งแต่อุณหภูมิกลางถึงสูง แบบที่ 3 textured surface coatings เป็นการปรับพื้นผิวของวัสดุให้เหมาะสมเพื่อลดค่าแผ่รังสีความร้อนของวัสดุ ในขั้นตอนการปรับปรุงพื้นผิวมีหลายขั้นตอนและซับซ้อนจึงทำให้ไม่ได้รับความนิยม แบบที่ 4 multilayer interference stacks เป็นการออกแบบให้ SSA เกิดการสะท้อนแสงหลายๆครั้งผ่านชั้นไดอิเล็กทริกและชั้นโลหะส่งผลให้เกิดการสูญเสียความร้อนต่ำ ชนิดของชั้นไดอิเล็กทริกที่นิยมใช้เช่น Al₂O₃, SiO₂, CeO₂, ZnS และชนิดของโลหะที่นำมาใช้ส่วนใหญ่เช่น Mo, Ag, Cu, Ni โดย SSA ชนิดนี้เหมาะสำหรับการใช้งานที่อุณหภูมิ >400 °C [7] ในปัจจุบัน SSA ที่นิยมนำมาใช้มากที่สุดคือ cermet composite coatings (แบบที่ 5) เป็น SSA ที่ประกอบด้วยอนุภาคโลหะนาโนฝังอยู่ในเซรามิกเมทริกซ์ เรียกว่าวัสดุชนิดนี้ว่าเซอรัม (cermet = ceramic + metal) ซึ่งเป็นการรวมสมบัติของวัสดุโลหะและเซรามิกเข้าด้วยกัน โดยเซรามิกจะมีความสามารถในการเก็บความร้อนและโลหะจะทำหน้าที่นำความร้อนและส่งผ่านความร้อนได้ดีส่งผลให้ได้ค่าการดูดกลืนแสงสูงสูญเสียความร้อนต่ำ และนำความร้อนส่งผ่านความร้อนได้ดี ซึ่งเป็นสมบัติที่ดีของ SSA [8] เพื่อให้ได้ค่าดูดกลืนแสงสูงสามารถทำได้โดยการปรับองค์ประกอบชั้น

cermet อัตราส่วนระหว่างโลหะกับเซรามิก ความหนา ความเข้มข้นของอนุภาค ขนาดรูปร่างและการจัดเรียงตัวของอนุภาค เป็นต้น

การเตรียม cermet composite coatings สามารถทำได้หลายวิธี เช่น electroplating, anodizing, evaporation, chemical vapor deposition (CVD), sputtering [9] แต่วิธีเหล่านี้มีข้อเสียคือ เป็นวิธีที่ยุ่งยากและต้นทุนสูง ดังนั้นอีกทางเลือกหนึ่งในการเตรียม SSA คือการทำปฏิกิริยาในรูปสารละลายและนำมาเคลือบลงบนชั้นรองรับ (ซับสเตรต) เช่น การใช้สปินโคท (spin-coat) ดิปโคท (dip-coat) และ สเปรย์โค้ท (spray coating) ซึ่งมีข้อดีหลายประการ เช่น เป็นวิธีการที่ง่าย ต้นทุนต่ำ ฟิล์มมีการยึดติดที่ดีบนพื้นผิวชนิดต่างๆ ไม่ว่าจะเป็น แก้ว โลหะ หรือ เซรามิก และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม [10] แต่ข้อเสียของวิธีเหล่านี้คือ ทำได้ยากในระดับอุตสาหกรรมเพราะต้องใช้สารละลายปริมาณมาก และที่สำคัญไม่สามารถควบคุมความหนาของชั้นฟิล์มในแต่ละชั้นที่แน่นอนได้ ดังนั้นมีอีกหนึ่งวิธีที่สามารถทดแทนวิธีดังกล่าวไว้ข้างต้นคือเทคนิคการเคลือบฟิล์มบางแบบการนำพาการระเหย (convective deposition) เนื่องจากสามารถเคลือบฟิล์มลงบนซับสเตรตขนาดใหญ่ได้ และใช้สารละลายปริมาณน้อยกว่า ซึ่งวิธีนี้เป็นการเตรียมฟิล์มบางในระดับนาโนเมตรและสามารถควบคุมความหนาของฟิล์มได้ โดยทั่วไปวิธีนี้ใช้เพื่อสร้างชั้นฟิล์มจากการนำพาและมารวมกันของอนุภาคคอลลอยด์หรืออนุภาคระดับนาโน ข้อดีของเทคนิคนี้คือสามารถขยายทำในระดับอุตสาหกรรมได้ ใช้สารปริมาณน้อย และที่สำคัญคือควบคุมความหนาของชั้นฟิล์มได้ดีกว่าวิธีอื่นๆ ฟิล์มที่ได้จึงเรียบและมีความหนาที่สม่ำเสมอ โดยอุปกรณ์ที่ใช้ในวิธีนี้ แสดงดังรูปที่ 3 ประกอบด้วย ใบปาดวางไว้ที่ท่ามุมใดๆ กับซับสเตรตและวางอยู่เหนือซับสเตรต ขั้นตอนการขึ้นฟิล์มมีดังนี้ 1) ใช้สารละลายประมาณระดับไมโครลิตรฉีดเข้าระหว่างใบปาดและซับสเตรต 2) ซับสเตรตจะถูกดึงออกไปในแนวนอนด้วยความเร็วที่กำหนดไว้ 3) ตัวทำละลายจะระเหยออกระหว่างการเคลื่อนที่และเกิดเป็นฟิล์มบางบนซับสเตรต [11] คุณสมบัติของฟิล์มที่ได้จะขึ้นอยู่กับตัวแปรต่างๆ เช่น ความเร็วในการดึงซับสเตรต อัตราการระเหย ความเข้มข้นของสารละลาย เป็นต้น



รูปที่ 3 เทคนิคการเคลือบฟิล์มบางแบบการนำพาการระเหย [11]

Zhenxiang Li และคณะผู้วิจัย [12] ได้เสนอ SSA ชนิดเซอร์เมทโดยใช้ solution-based ที่มีนิกเกิลไนเตรทและอลูมิเนียมไนเตรทเป็นสารตั้งต้น เตรียมฟิล์มโดยใช้วิธี spin-coat จากผลการทดลองพบว่ามีความดูดกลืนแสงมากถึง 85% และมีค่าการแผ่รังสีความร้อนน้อยกว่า 3% แต่วิธีนี้ยังพบปัญหาในเรื่องความหนาของชั้นฟิล์ม ซึ่งควบคุมได้ยากและมีความหนาที่ไม่สม่ำเสมอทำให้ประสิทธิภาพของ SSA ลดลง

ในงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอการสังเคราะห์นิกเกิลให้เป็นสายโซ่ต่อกันเป็นเส้นยาวเพื่อจะช่วยให้เรื่องการนำความร้อนและส่งผ่านความร้อนได้ดีกว่านิกเกิลที่อยู่ในรูปของอนุภาค ส่งผลให้ได้ค่าการดูดกลืนแสงเพิ่มขึ้นและสูญเสียความร้อนลดลง อนุภาคนาโนนิกเกิลถูกสังเคราะห์ด้วยปฏิกิริยารีดักชัน [13] และนำมาผสมกับอะลูมินาที่เตรียมให้อยู่ในรูปของโซลเจล (sol-gel) [14] จากนั้นขึ้นรูปเป็นฟิล์มอนุภาคนาโนนิกเกิล-อะลูมินาบนสแตนเลสที่ใช้เป็นซับสเตรตโดยใช้วิธี convective deposition และศึกษาตัวแปรที่ส่งผลต่อโครงสร้างและลักษณะทางสัณฐานวิทยาของอนุภาคนาโนนิกเกิล โดยศึกษาผลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ในสารละลายสารของขั้นตอนการเตรียมอนุภาคนาโนนิกเกิลส่งผลให้ได้ขนาดและความยาวของนิกเกิลนาโนเซนที่แตกต่างกัน [15] และผลของปริมาณอนุภาคนาโนนิกเกิลในอะลูมินาที่เหมาะสมในการขึ้นฟิล์ม ซึ่งตัวแปรเหล่านี้มีผลต่อโครงสร้างและลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์มและส่งผลต่อสมบัติทางแสงของ SSA

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาผลสัดส่วนเชิงโมลของ NaOH ต่อ NiCl_2 ที่มีผลต่อโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของอนุภาคนาโนนิกเกิล
2. เพื่อศึกษาผลของปริมาณของอนุภาคนาโนนิกเกิลต่อการกระจายตัวในอะลูมินาเมทริกซ์และสมบัติเชิงแสงของเมทริกซ์นั้น

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาผลของสัดส่วนเชิงโมลของ NaOH ต่อ NiCl_2 ที่อัตราส่วน 4, 6, 8, 10, 12, 20
2. ศึกษาโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของอนุภาคนาโนนิกเกิลที่เหมาะสมสำหรับตัวดูดซับพลังงานแสงอาทิตย์
3. ศึกษาผลของปริมาณของอนุภาคนาโนนิกเกิลที่ 0.01, 0.02, 0.05, 0.1, 0.2 กรัม ในอะลูมินาเมทริกซ์

1.3.1 เครื่องมือวิเคราะห์โครงสร้างและลักษณะทางสัณฐานวิทยาของอนุภาคนาโนนิกเกิล

X-ray diffraction (XRD): วิเคราะห์โครงสร้างผลึกของอนุภาคนาโนนิกเกิล

Scanning electron microscopy (SEM): วิเคราะห์โครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของอนุภาคนาโนนิกเกิล

Energy dispersive x-ray spectroscopy (EDS): วิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของอนุภาคนาโนนิกเกิล

Transmission electron microscopy (TEM): วิเคราะห์โครงสร้างภายในและลักษณะทางกายภาพของผลึก

1.3.2 เครื่องมือวิเคราะห์คุณสมบัติฟิล์มอนุภาคนาโนนิกเกิล-อะลูมินา

X-ray diffraction (XRD): วิเคราะห์โครงสร้างผลึกของฟิล์มอนุภาคนาโนนิกเกิล-อะลูมินา

Energy-dispersive X-ray spectroscopy (ED-XRF): วิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของฟิล์มอนุภาคนาโนนิกเกิล-อะลูมินา

Energy dispersive x-ray spectroscopy (EDS): วิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของฟิล์มอนุภาคนาโนนิกเกิล-อะลูมินา และดูการกระจายตัวของอนุภาคนิกเกิลในอะลูมินา

Scanning electron microscopy (SEM): วิเคราะห์โครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของฟิล์มอนุภาคนาโนนิกเกิล-อะลูมินา

UV-Vis NIR spectroscopy: วัดค่าการสะท้อนแสงของฟิล์มอนุภาคนาโนนิกเกิล-อะลูมินา

Emissometer: วัดค่าการแผ่รังสีความร้อนของฟิล์มอนุภาคนาโนนิกเกิล-อะลูมินา

Thermocouple, Thermometers: วัดอุณหภูมิของฟิล์มอนุภาคนาโนนิกเกิล-อะลูมินา และคำนวณหาค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity, k)

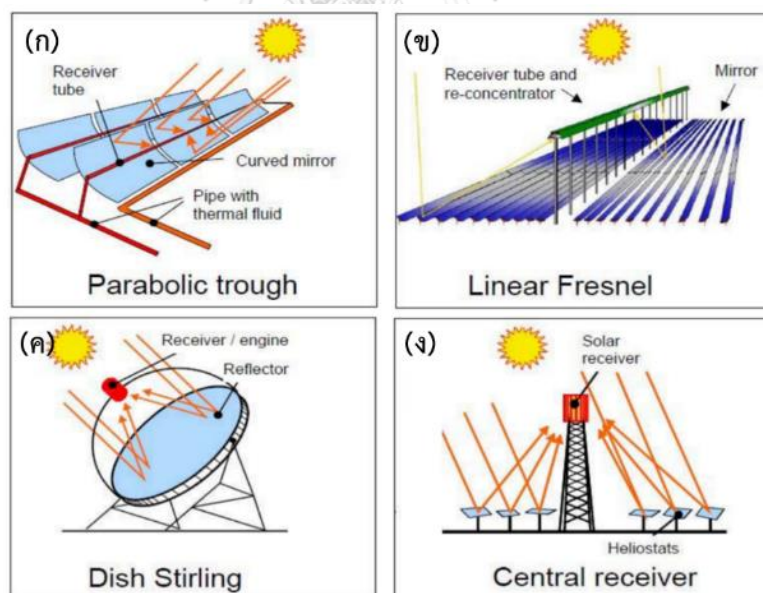
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ระบบรวมแสงอาทิตย์

2.1.1 ประเภทและส่วนประกอบของ CSPs

การเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ไปเป็นพลังงานไฟฟ้าแบบทางอ้อม คือการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ไปเป็นความร้อน จากนั้นนำความร้อนที่ได้ไปผลิตพลังงานไฟฟ้าหรือพลังงานรูปแบบอื่นๆ โดยอาศัย CSPs ทำหน้าที่รวมแสงอาทิตย์และเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน ความร้อนที่เกิดขึ้นจะถูกส่งผ่านไปยังของไหล (heat transfer fluid) ที่อยู่ในระบบซึ่งจะทำหน้าที่รับพลังงานความร้อนและส่งผ่านพลังงานความร้อนไปผลิตพลังงานรูปแบบอื่นเช่น การผลิตไอน้ำ การผลิตกระแสไฟฟ้าหรือพลังงานรูปแบบอื่นๆ [16]

CSPs สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ระบบ ตามลักษณะการรวมแสง คือ 1.ระบบรวมแสงตามแนวได้แก่ รังพาราโบลา (parabolic trough) และเฟรสเนลแบบเส้นตรง (linear fresnel) 2. ระบบรวมแสงเป็นจุด ได้แก่ จานสเตอร์ลิง (dish stirling) และตัวรับศูนย์กลาง (central receiver) แสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ประเภทของ CSPs (ก) รังพาราโบลา (ข) เฟรสเนลแบบเส้นตรง (ค) จานสเตอร์ลิง และ (ง) ตัวรับตำแหน่งศูนย์กลาง [16]

ประเภทของ CSPs แบบแรกคือ รางพาราโบลาประกอบด้วย กระจก ตัวเก็บความร้อน และ โครงสร้างกระจกจะทำหน้าที่รวมพลังงานแสงอาทิตย์ไปที่ตัวรับที่เป็นท่อแนวยาวเพื่อเก็บสะสม พลังงานความร้อน ตัวรับแสงจะเป็นท่อทำหน้าที่ดูดซับแสงอาทิตย์เอาไว้ นอกจากนั้นจะมีของไหล เคลื่อนที่อยู่ด้านในท่อดูดซับซึ่งทำหน้าที่ถ่ายเทความร้อน ทำให้สามารถเก็บสะสมความร้อนไว้ได้ ความร้อนจะถูกส่งไปที่เครื่องผลิตไอน้ำหรือส่งไปเก็บที่ระบบกักเก็บความร้อนของ CSPs [17]

แบบที่สอง เพรสเนลแบบเส้นตรง มีลักษณะที่คล้ายกับแบบรางพาราโบลา แตกต่างกันตรง กระจกที่นำมาใช้จะมีลักษณะเป็นแผ่นราบ ไม่มีความโค้งงอ แสงอาทิตย์จะถูกสะท้อนจากกระจกแล้ว มารวมที่ตัวรับ ซึ่งจะวางเป็นแนวยาวตามกระจกและจะมีกระจกครอบไว้ด้านบนอีกชั้นเพื่อที่จะทำ การรวมแสงที่ไม่ได้ส่งไปที่ตัวรับอีกรอบ เทคโนโลยีนี้มีข้อดี คือ มีราคาการผลิตและโครงสร้างที่ถูกกว่า และพื้นที่ของกระจกต่อตัวรองรับมีปริมาณมากกว่าทำให้สามารถรวมรังสีจากแสงได้ในปริมาณมาก [18]

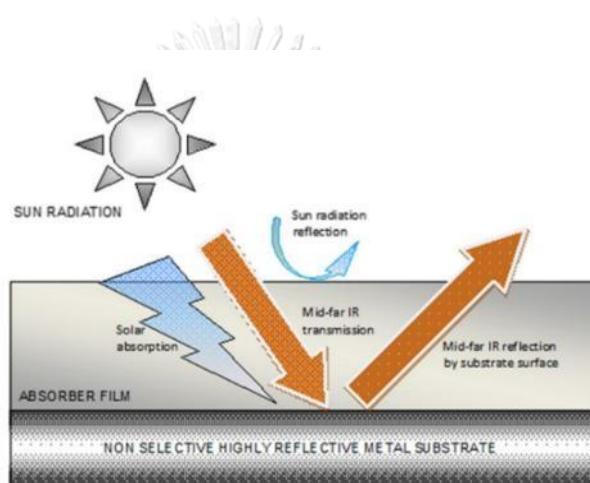
แบบที่สามจานสเตอร์ลิงประกอบด้วยจานพาราโบลาซึ่งมีลักษณะเหมือนกับจานดาวเทียมทำหน้าที่ สะท้อนรังสีจากแสงอาทิตย์ไปที่ตัวรับโดยตัวรับอาจจะเป็นเครื่องจักรสเตอร์ลิงหรือไมโครเทอร์ไบน์ (micro-turbine) ซึ่งจะวางไว้ด้านหน้าจานพาราโบลาทำให้จุดนี้มีอุณหภูมิสูงมาก ในปัจจุบันมี งานวิจัยจำนวนมากที่สนใจศึกษาการใช้เครื่องจักรสเตอร์ลิงเพื่อทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานความร้อนไป เป็นกระแสไฟฟ้าได้โดยมีข้อดี คือ สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ด้วยตัวเองสามารถเพิ่มกำลังการผลิต ได้โดยการเพิ่มจำนวนเครื่องจักรสเตอร์ลิงและมีการสูญเสียความร้อนต่ำจึงทำให้มีประสิทธิภาพสูง [19]

แบบที่สี่เทคโนโลยีการรวมความเข้มแสงอาทิตย์แบบตัวรับศูนย์กลางเทคโนโลยีนี้จะใช้พื้นที่ใน การติดตั้งกระจกมากซึ่งทำหน้าที่ฉายรังสีพลังงานแสงอาทิตย์ไปที่ตัวรับที่ติดตั้งอยู่ด้านบนตึกสูงโดย ทำหน้าที่กักเก็บพลังงานและเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของความร้อน เทคโนโลยีจะสามารถรับอุณหภูมิจาก พลังงานแสงอาทิตย์ได้สูงกว่าแบบรางพาราโบลาและเพรสเนลแบบเส้นตรงเนื่องจากสามารถรับ แสงอาทิตย์ได้ในปริมาณมากตั้งแต่อุณหภูมิ 250 ถึง 1,000 องศาเซลเซียส ในปัจจุบันเทคโนโลยีนี้ สามารถใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าได้ตั้งแต่ 10 เมกะวัตต์ ถึง 50 เมกะวัตต์ เนื่องจากการทำงานของ ตัวกักเก็บพลังงานที่อุณหภูมิสูงทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของกังหันไอน้ำมีประสิทธิภาพสูงและยัง ช่วยลดการใช้น้ำหล่อเย็นลงได้ [20]

การเลือกระบบ CSPs ไปใช้งานควรเลือกใช้ตามความเหมาะสม เนื่องจากแต่ละแบบมีข้อดี ข้อเสียที่แตกต่างกันมีหลักการทำงานและความสามารถที่แตกต่างกันเช่น สภาวะในการทำงานและ ความสามารถในการผลิตพลังงานไฟฟ้า เป็นต้น

2.1.2 หลักการทำงาน

SSA มีบทบาทสำคัญอย่างมากต่อประสิทธิภาพของระบบ CSP โดยรวมเนื่องจากทำหน้าที่ดูดซับพลังงานแสงอาทิตย์และเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน [21] เมื่อแสงอาทิตย์แผ่มาบางส่วนจะถูกสะท้อนกลับแต่ส่วนใหญ่จะถูกดูดซับไว้ SSA จะดูดซับแสงอาทิตย์และเปลี่ยนเป็นความร้อน SSA จะเกิดการสูญเสียความร้อนบางส่วนให้กับสภาพแวดล้อมผ่านการนำความร้อนและการแผ่รังสี [3] แสดงดังรูปที่ 5 ประสิทธิภาพที่ดีของ SSA ควรมีค่าการดูดซับพลังงานแสงอาทิตย์ที่ดี มีการปล่อยรังสีอินฟราเรดต่ำ (IR) และมีค่าการนำความร้อนสูง

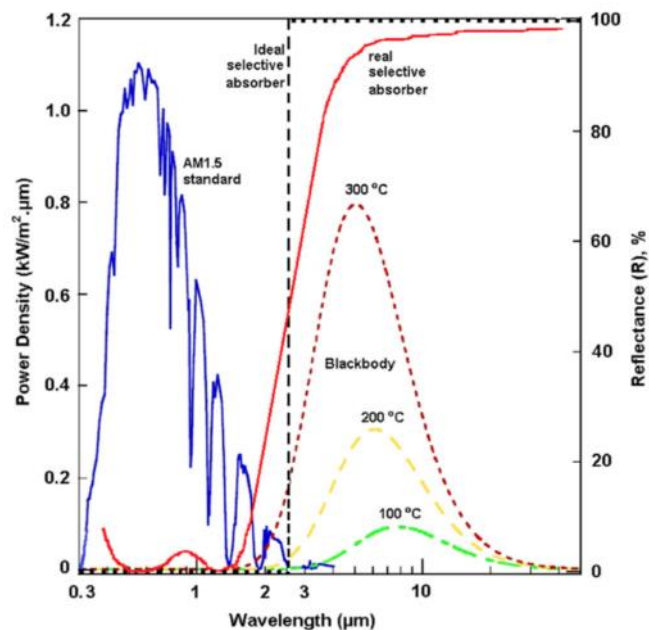


รูปที่ 5 หลักการทำงานตัวดูดซับรังสีดวงอาทิตย์แบบจำเพาะ (solar selective absorber, SSA) [3]

2.2 สมรรถนะตัวดูดซับแสงดวงอาทิตย์แบบจำเพาะ (solar selective absorber, SSA)

สเปกตรัมการแผ่รังสีแสงอาทิตย์บริเวณพื้นผิวโลกหลังถูกดูดซับที่ชั้นบรรยากาศจะอยู่ในช่วงระหว่าง $0.3 - 2.5 \mu\text{m}$ (ISO 9845-1,1992) คือช่วงความยาวคลื่น UV-Vis, NIR โดยที่ประมาณ 0.55 mm จะมีปริมาณความเข้มแสงอาทิตย์สูงสุด และในช่วงความยาวคลื่นที่มากกว่า $2 \mu\text{m}$ จะเกิดการแผ่รังสีความร้อนออกมาซึ่งเป็นคุณสมบัติทางแสงช่วงความยาวคลื่น NIR หากอุณหภูมิของวัตถุต่ำเพิ่มขึ้นปริมาณของพลังงานความร้อนที่ปล่อยออกมาก็จะเพิ่มขึ้นเช่นกัน และตำแหน่งของพีกพลังงานจะเปลี่ยนไปอยู่ตำแหน่งความยาวคลื่นที่สั้นลง ตัวอย่างเช่น ที่อุณหภูมิของวัสดุประมาณ 100°C ตำแหน่งพีกพลังงานจะอยู่ที่ประมาณ $3 \mu\text{m}$ ในขณะที่อุณหภูมิประมาณ 300°C ตำแหน่งของพีกพลังงานจะอยู่ที่ $2 \mu\text{m}$ ในการออกแบบพื้นผิววัสดุ SSA นั้นควรมีคุณสมบัติเหมือนตัวดูดซับรังสีดวงอาทิตย์ในอุดมคติ (เส้นสีดำ) [22] แสดงให้เห็นถึงการดูดซับได้ดีในช่วงรังสีแสงอาทิตย์และสะท้อน

กลับมากในช่วงความยาวคลื่น NIR เพื่อให้ได้ค่าการดูดซับรังสีแสงอาทิตย์สูงสุดและได้ค่าปลดปล่อยพลังงานความร้อนต่ำ แสดงดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 ประสิทธิภาพเชิงสเปกตรัมของสเปกตรัมของดวงอาทิตย์ที่ AM 1.5 และสเปกตรัมการแผ่รังสีของวัตถุดำที่อุณหภูมิแตกต่างกัน [22]

SSA ที่มีประสิทธิภาพพิจารณาจาก ค่าการดูดกลืนแสงสูงและค่าการปล่อยพลังงานความร้อนต่ำ การดูดซับพลังงานแสงอาทิตย์ (α) เป็นค่าการถ่วงน้ำหนักระหว่างการดูดกลืนรังสีและรังสีแสงอาทิตย์ที่แผ่เข้ามา (sol) ในขณะที่การแผ่รังสีความร้อน (ϵ) เป็นค่าการถ่วงน้ำหนักระหว่างการแผ่รังสีที่ปล่อยออกมาและ Planck black body distribution (I_p) [23] สามารถคำนวณได้ในสมการของ surface reflectance ($R(\lambda)$) ซึ่งได้จากวัดการสะท้อนของฟิล์มโดยใช้เครื่อง UV-Vis spectroscopy

2.3 การวัดค่าการนำความร้อนของวัสดุฟิล์มบาง (Conductivity of Thin Film Materials)

ค่าการนำความร้อนของวัสดุฟิล์มบางจะแตกต่างจากวัสดุก้อน (bulk) ประการแรกเทคโนโลยีการเตรียมฟิล์มบางโดยทั่วไปแล้วจะเกิดสิ่งเจือปนจำนวนมาก เกิดการแยกจากกันของผลึก เกิด grain boundaries ขนาดเล็ก และเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างระดับจุลภาค ซึ่งสิ่งเหล่านี้มีผลต่อค่าการนำความร้อน ประการที่สองแม้ว่าจะสามารถเตรียมฟิล์มได้ดีและเกิดข้อบกพร่องน้อยแต่ก็อาจ

ส่งผลให้ค่าการนำความร้อนลดลงเนื่องจากเกิดการกระเจิงภายใน grain boundaries และเกิด phonon leakage ภายในวัสดุฟิล์มบาง ด้วยเหตุผลทั้งสองนี้มีผลต่อการขนส่งความร้อนในระนาบ cross-plane และ in-plane ที่แตกต่างกัน ซึ่งค่าการนำความร้อนของฟิล์มบางโดยทั่วไปจะขึ้นกับทิศทาง (anisotropic) ในสองทิศทางนี้ ซึ่งแตกต่างจากวัสดุประเภท bulk ที่ค่าการนำความร้อนจะไม่ขึ้นกับทิศทาง (isotropic) ดังนั้นเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพค่าการนำความร้อนที่ดีที่สุดของฟิล์มบาง จำเป็นต้องศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ต่อไปนี้ คือ โครงสร้างจุลภาค เช่นผลึกและสมบัติของแรงยึดระหว่างฟิล์มบางและพื้นผิว (Interfacial) และการนำความร้อนของทั้งสองระนาบ โดยทั่วไปการวัดค่าการนำความร้อนของฟิล์มบางสามารถวัดได้หลายวิธีเช่น axial/radial heat flow method, steady-state electrical heating method, laser flash method หรือ transient thermoreflectance technique (TDTR), 3ω method [24]

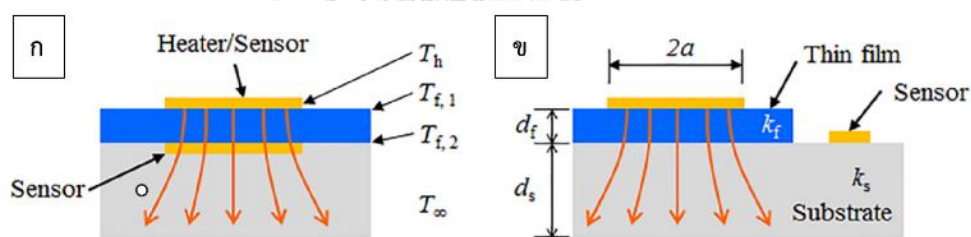
มีงานวิจัยได้ศึกษาค่าการนำความร้อนของฟิล์มบาง polycrystalline AlN ที่เคลือบลงบนพื้นผิว Si โดยใช้เทคนิค radio frequency (RF) magnetron sputtering ได้ค่าการนำความร้อนเท่ากับ 0.5 – 50 W/(mK) พบว่าวิธีการเตรียมฟิล์มบางนั้นเป็นปัจจัยสำคัญซึ่งเกี่ยวข้องกับความบริสุทธิ์ของฟิล์มและมีผลอย่างมากกับค่าการนำความร้อนของฟิล์มบาง Pan และคณะผู้วิจัยพบว่าการปรับปรุงส่วนต่อประสานระหว่างฟิล์มบาง AlN และ Si ส่งผลให้ค่าการนำความร้อนเพิ่มเป็น 9.9 – 26.7 W/(m·K) ที่อุณหภูมิ 330 – 560 °C และพบว่าค่าการนำความร้อนของวัสดุฟิล์มบางขึ้นกับความหนา โครงสร้างระดับจุลภาค (microstructure) และออกซิเจนที่เจือปน (oxygen impurities) พบว่าเมื่อขนาดของ grain ลดลงและปริมาณออกซิเจนเพิ่มขึ้น ฟิล์มจะบางลง [25]

เมื่อไม่นานมานี้ Duquenne และคณะผู้วิจัยเตรียมฟิล์ม AlN โดยใช้เทคนิค direct current (DC) balanced magnetron sputtering โดยมีความหนาฟิล์มประมาณ 800 – 3500 nm ได้ค่าการนำความร้อนเท่ากับ 2.5 – 50 W/(m·K) และเปลี่ยนการเตรียมฟิล์มโดยใช้เทคนิค unbalanced magnetron sputtering ความหนาฟิล์มลดลงประมาณ 150 – 3500 nm ได้ค่าการนำความร้อนเพิ่มขึ้นเท่ากับ 20 – 130 W/(m·K) เนื่องจากการใช้ unbalanced magnetron ส่งผลให้พลังงานสูงขึ้นและอุณหภูมิที่สูงขึ้นมีส่วนช่วยใช้กระบวนการเคลือบฟิล์มดีขึ้นค่าการนำความร้อนจึงเพิ่มขึ้นจึงสรุปได้ว่าการเตรียมฟิล์มด้วยวิธีที่ต่างกันส่งผลให้ได้ค่าความหนาฟิล์มต่างกันค่าการนำความร้อนจึงแตกต่างกัน [26]

2.3.1 การวัดค่าการนำความร้อนของฟิล์มบางโดยใช้วิธี Steady-State Methods แบบ Cross-Plane

อุณหภูมิของฟิล์มบางจะลดลงตามแนวขวาง จึงจำเป็นต้องวัดเพื่อได้ค่าการนำความร้อนในระนาบ Cross-Plane การวัดการลดลงของอุณหภูมินั้นเป็นสิ่งที่ท้าทายอย่างยิ่งเนื่องจากความหนา

ของฟิล์มที่น้อยมากในระดับไมกิโลเมตรถึงสิบล้านไมโครเมตร รูปที่ 7 (ก-ข) แสดงวิธีการวัดค่านำความร้อนโดยใช้วิธี Steady-State Methods สำหรับวัดค่านำความร้อนระนาบ Cross-Plane โดยความหนาของฟิล์มคือ d_f ที่เคลือบลงบนพื้นผิวที่มีการนำความร้อนสูงและมีความหยาบของพื้นผิวเล็กน้อย (เช่น แผ่นซิลิคอนขัดเงา) มีแถบโลหะที่มีความยาว L และความกว้าง $2a$ ($L \gg 2a$) จะถูกเคลือบลงบนฟิล์มบางซึ่งโลหะที่นำมาใช้นั้นควรมีความต้านทานที่อุณหภูมิสูงเช่น Cr/Au ในระหว่างการทดสอบแถบโลหะจะได้รับความร้อนจากไฟฟ้ากระแสตรง (DC) ที่ไหลผ่านแถบโลหะทำหน้าที่เป็นทั้งฮีตเตอร์ให้ความร้อนและเซ็นเซอร์เพื่อวัดอุณหภูมิ (T_h) อุณหภูมิด้านบนของฟิล์มคือ T_{f1} โดยทั่วไปจะถือว่าเป็นเช่นเดียวกับอุณหภูมิฮีตเตอร์เฉลี่ย T_h , T_{∞} คืออุณหภูมิโดยรอบ วิธีที่ตรงไปตรงมาที่สุดคือการใช้เซ็นเซอร์อีกตัวเพื่อวัดอุณหภูมิ T_{f2} โดยไว้ตรงที่ด้านล่างของฟิล์ม (รูปที่ 7 (ก)) แต่วิธีนี้จะทำให้ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างยุ่งยาก มีอีกวิธีให้เซ็นเซอร์อีกตัวอยู่ทางด้านขวาของ substrate เพื่อวัดอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของฟิล์มด้านล่าง (รูปที่ 8 (ข)) [27]



รูปที่ 7 แสดงวิธีการวัดค่านำความร้อนโดยใช้วิธี Steady-State Methods สำหรับวัดค่านำความร้อนระนาบ Cross-Plane (ก) เซ็นเซอร์จะถูกลวางระหว่างฟิล์มและ substrate สำหรับการวัดโดยตรง (ข) เซ็นเซอร์อีกตัวจะวางอยู่ทางด้านขวาของ substrate เพื่อวัดอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของฟิล์ม [27]

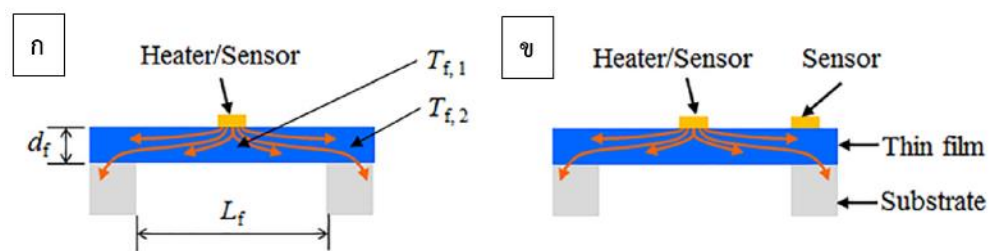
2.3.2 การวัดค่าการนำความร้อนของฟิล์มบางโดยใช้วิธี Steady-State Methods แบบ In-Plane

การหาค่าความร้อนตามแนวยาวของฟิล์มในการวัดจำเป็นต้องมี in-plane thermal conductivity (k_{fl}) โดยที่ $k_{fl} d_f \geq k_s d_s$ อย่างไรก็ตามเพื่อที่จะวัดการสูญเสียความร้อนผ่านพื้นผิวอย่างสมบูรณ์ จึงทำการเปลี่ยนแปลงพื้นผิวออกแสดงดังรูปที่ 7 (ก) และมีแถบโลหะ (Cr / Au) วางอยู่ด้านบนเป็นชั้นบาง ๆ ที่ทำหน้าที่เป็นทั้งฮีตเตอร์และเซ็นเซอร์อุณหภูมิ เมื่อความร้อนจากไฟฟ้ากระแสตรง (DC) ที่ไหลผ่านฮีตเตอร์/เซ็นเซอร์ อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นในฮีตเตอร์/เซ็นเซอร์เป็นฟังก์ชันของพลังงานความร้อน, การนำความร้อนของฟิล์มบาง, อุณหภูมิโดยรอบ, ความหนาฟิล์ม (d_f) และความกว้าง (L_f) ค่าการนำความร้อนในระนาบ In-Plane สามารถถูกอนุมานได้จากความแตกต่างอุณหภูมิของตัวฮีตเตอร์/เซ็นเซอร์ของการวัดสองจุด และพารามิเตอร์อื่นๆ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงแสดงในรูปที่

8 (ก) และรูปที่ 8 (ข) แสดงการมีฮีตเตอร์อีกตัวใช้ในการวัดอุณหภูมิของชุดระบายความร้อน (heat sink) ค่าการนำความร้อนสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้ [27]

$$k_{fII} = \frac{QL_f}{2d_f(T_{f1}-T_{f2})} \quad (4)$$

โดยที่ Q คือกำลังงานที่เกิดขึ้นในฮีตเตอร์โลหะ $L_f = 2$ คือระยะห่างจากฮีตเตอร์ถึงฮีตซิงค์ T_{f1} คืออุณหภูมิของฟิล์มบางที่อยู่ด้านล่างของฮีตเตอร์/ฮีตเตอร์ ซึ่งจะถือว่าอุณหภูมิเดียวกันกับฮีตเตอร์/ฮีตเตอร์และ T_{f2} คืออุณหภูมิของฟิล์มบางที่สัมผัสพื้นผิว (substrate)



รูปที่ 8 แสดงวิธีการวัดค่าการนำความร้อนโดยใช้วิธี Steady-State Methods สำหรับวัดค่าการนำความร้อนระนาบ In-Plane (ก) ค่าการนำความร้อนในระนาบสามารถถูกอนุมานได้จากความแตกต่างอุณหภูมิของฮีตเตอร์/ฮีตเตอร์ (ข) การวัดค่าการนำความร้อนด้วยฮีตเตอร์/ฮีตเตอร์และมีฮีตเตอร์อุณหภูมิ [27]

2.4 ประเภทตัวดูดซับแสงอาทิตย์แบบจำเพาะ (solar selective absorber, SSA)

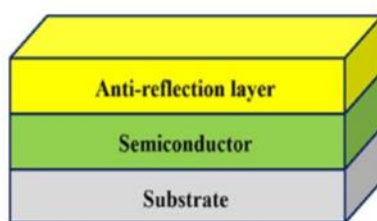
2.4.1 Intrinsic



รูปที่ 9 ตัวดูดซับ intrinsic [28]

intrinsic หรือ mass absorber เป็นการนำคุณสมบัติจำเพาะหรือคุณสมบัติที่แท้จริงของวัสดุ นั้นๆมาใช้ ซึ่งวัสดุจะมีความเสถียรทางโครงสร้างมากแต่ประสิทธิภาพทางแสงน้อยกว่าแบบ multilayer stacks ตัวอย่างเช่น โลหะ W, MoO₃-doped Mo, Si doped B, CaF₂, HfC, ZrB₂, SnO₂, In₂O₃, Eu₂O₃, ReO₃, V₂O₅ [7] แท้จริงแล้วคุณสมบัติตามธรรมชาติของวัสดุไม่มีคุณสมบัติ การเลือกพลังงานแสงอาทิตย์ในอุดมคติแต่เป็นเพียงคุณสมบัติการเลือกแบบคร่าวๆ วัสดุ intrinsic ที่มีคุณสมบัติการเลือกพลังงานแสงอาทิตย์แบบจำเพาะมักพบได้ในโลหะทรานซิชันและเคมีคอนดักเตอร์ แต่ทั้งสองต้องได้รับการปรับเปลี่ยนก่อนนำมาใช้เป็นตัวดูดซับแสง ตัวอย่างเช่น Hafnium carbide (HfC) [29] มีพื้นที่ผิวการดูดซับแบบจำเพาะจึงสามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงได้เพราะ HfC มีจุดหลอมเหลวสูง อย่างไรก็ตาม HfC ต้องได้รับการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและองค์ประกอบภายใน โครงสร้าง หรือเพิ่มชั้น antireflective (AR) ก่อนเพื่อให้มีคุณสมบัติที่ต้องการเป็นต้น ตัวอย่างชั้น AR เช่น SiO, SiO₂, Si₃N₄, TiO₂, Ta₂O₅, Al₂O₃, ZrO₂, Nd₂O₃, MgO, MgF₂ และ SrF₂ [30, 31] การเคลือบ AR จะมีลักษณะเป็นชั้นบางๆโดยใช้วัสดุสองชนิดที่มีคุณสมบัติการหักเหแสงที่เหมาะสม ในอดีตงานวิจัยเกี่ยวกับตัวดูดซับแสงอาทิตย์ชนิด intrinsic ไม่ได้ได้รับความนิยมมากนักเนื่องจากไม่มีคุณสมบัติตามธรรมชาติของวัสดุชนิดไหนที่สมบูรณ์เหมาะสำหรับนำมาใช้เป็น SSA ได้เลย ส่วนมาก วัสดุ Intrinsic นำมาใช้งานแบบ multilayer หรือใช้เป็นสารเคลือบผสม [28]

2.4.2 Semiconductor-metal tandem



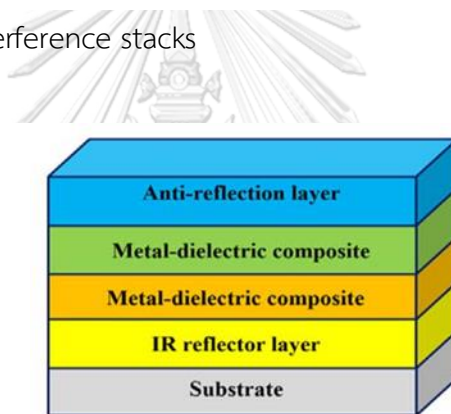
รูปที่ 10 semiconductor-metal tandem [28]

วัสดุเคมีคอนดักเตอร์หรือเรียกอีกอย่างว่าสารกึ่งตัวนำ สำหรับ SSA นั้นจะมุ่งเน้นไปที่เคมีคอนดักเตอร์ที่มี band gap ในช่วง 0.5 eV (2.5 μm) ถึง 1.26 eV (1.0 μm) ซึ่งเป็นช่วงความยาวคลื่นที่ต้องการ (ความยาวคลื่นแสงอาทิตย์) เหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้เป็น SSA ตัวอย่างสารกึ่งตัวนำเช่น Si (1.1 eV), Ge (0.7 eV), PbS (0.4 eV) [32]

Yang และคณะผู้วิจัยกล่าวว่าข้อดีของคอปเปอร์ออกไซด์ที่เป็นสารกึ่งตัวนำ (CuO, Cu₂O) มี band gap อยู่ที่ 1.4 และ 2.0 eV ตามลำดับ คอปเปอร์ออกไซด์ได้ถูกเคลือบด้วยวิธี chemical

conversion method และได้ประสิทธิภาพการดูดกลืนแสงเท่ากับ 0.94 และค่าการปล่อยความร้อนเท่ากับ 0.08 [33] โดยคุณสมบัติพื้นฐานของชั้นที่ประกอบไปด้วยโลหะจะช่วยสะท้อนความยาวคลื่นในช่วงอินฟราเรดส่งผลให้ค่าปล่อยความร้อนลดลง พบว่าข้อเสียของสารเคลือบกึ่งตัวนำคือมีค่าดัชนีการหักเหแสงสูงทำให้สูญเสียแสงสะท้อนมากจึงส่งผลให้ค่าการดูดกลืนแสงลดลง สามารถปรับปรุงได้โดยการเคลือบสาร antireflection (AR) ลงไปด้านบนของสารกึ่งตัวนำ ตัวอย่างเช่น MgF_2 , SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2 เพื่อลดการสูญเสียแสงสะท้อน [34] Seraphin และคณะผู้วิจัยใช้สารกึ่งตัวนำมาทำการเคลือบหลายชั้นด้วย $SS/Cr_2O_3/Ag/Cr_2O_3/Si_3N_4/SiO_2$ โดยใช้วิธี chemical vapor deposition ซิลิคอนทำหน้าที่เป็นชั้นหลักสำหรับดูดกลืนแสงและชั้น Si_3N_4 และ SiO_2 ทำหน้าที่เป็นชั้นป้องกันการสะท้อนกลับ ได้ค่าการดูดกลืนแสงเท่ากับ 0.85 และค่าการแผ่รังสีความร้อนเท่ากับ 0.07 และมีความเสถียรทางความร้อนสูงสุดถึง $500^\circ C$ [35]

2.4.3 Multilayer interference stacks



รูปที่ 11 multilayer interference stacks [28]

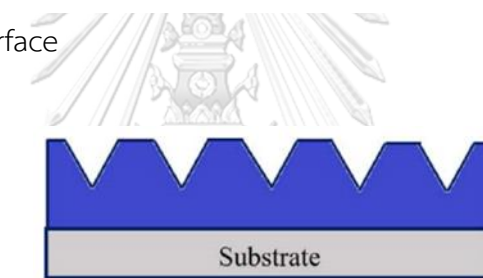
พื้นฐานโดยส่วนใหญ่แล้วการใช้ intrinsic หรือ สารกึ่งตัวนำเป็น ASS ไม่เหมาะสมสำหรับการใช้งานที่อุณหภูมิสูง ดังนั้นในปีที่ผ่านมาการเคลือบด้วยโครงสร้างหลายชั้นจึงได้รับความนิยมมากกว่า เนื่องจากสามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงได้ การเคลือบหลายชั้นจะประกอบด้วยชั้นของโลหะอิเล็กทริกและชั้นโลหะกึ่งโปร่งใส ชั้นไดอิเล็กทริกจะดูดซับแสงได้ดีในช่วงความยาวคลื่น visible และโลหะจะช่วยให้เกิดการสะท้อนในช่วงความยาวคลื่นอินฟราเรด และเคลือบชั้น AR ด้านบนเพื่อป้องกันการสะท้อนและช่วยส่งผ่านแสงไปยังชั้นดูดซับ ในการเคลือบหลายชั้นการซ้อนทับของคลื่นแสงนำไปสู่การแทรกสอดซึ่งจะขึ้นอยู่กับช่วงของคลื่นแสงแต่ละคลื่น การแทรกสอดจะช่วยป้องกันการสะท้อนกลับของแสงและเพิ่มการดูดซับแสง การปรับความหนาซึ่งความหนาของแต่ละชั้นเพื่อให้ได้คุณสมบัติการเลือกพลังงานแสงอาทิตย์ที่ดี ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมาโลหะทรานซิชันของกลุ่ม IVA, VA, VIA และการ

เคลือบผิวด้วย nitride/oxynitride/oxide ได้รับความสนใจอย่างมากเนื่องจากมีความเสถียรที่อุณหภูมิสูง

กลุ่ม ALMECO และคณะผู้วิจัยได้ทำการพัฒนาสารเคลือบแบบหลายๆชั้น W/WAIN/WALON/ Al_2O_3 พบว่าได้ค่าการดูดกลืนแสงมากถึง 0.958 และค่าการแผ่รังสีความร้อนเท่ากับ 0.08 และสามารถทนอุณหภูมิได้ถึง $350^{\circ}C$ ในอากาศเป็นเวลา 550 ชั่วโมง [36] แต่พบว่าการเคลือบแบบหลายชั้นนั้นมีข้อเสียคือต้นทุนการผลิตสูง แต่อย่างไรก็ตามการเคลือบเหล่านี้สามารถผลิตได้โดยวิธีการทางเคมีแบบง่าย โดยใช้วิธี wet chemistry ซึ่งจะสามารถลดต้นทุนการผลิตได้

Bayon และคณะผู้วิจัยได้ทำการ deposited $CuMnSiO_x/CuMnO_x/SiO_2$ เคลือบลงบน Al ด้วยวิธีการ dip-coating ได้ค่าการดูดกลืนแสงเท่ากับ 0.95 ซึ่งมีคุณสมบัติเทียบเท่ากับการเคลือบด้วยวิธี sputter ที่ใช้ในเชิงพาณิชย์ [37-39]

2.4.4 Textured surface

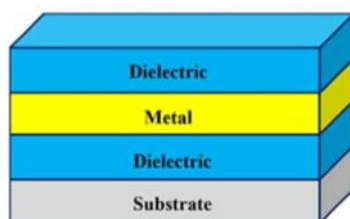


รูปที่ 12 textured surface [28]

การเคลือบหลายชั้นเมื่อใช้งานที่อุณหภูมิสูงมากๆ ($>1,000^{\circ}C$) จะเกิดปัญหาการออกซิเดชัน, เกิดปฏิกิริยาขององค์ประกอบระหว่างชั้นและเกิดความเครียดเชิงกลระหว่างชั้นนั้นๆ เพื่อกำจัดข้อบกพร่องเหล่านั้น เทคโนโลยีการทำพื้นผิวใหม่ที่เป็นรูพรุน, เม็ด, เส้น หรือมีโครงสร้างคล้ายเข็มจะมีความสามารถในการดูดกลืนแสงอาทิตย์สูง ดักจับพลังงานแสงอาทิตย์ได้หลายครั้งและปล่อยพลังงานความร้อนต่ำ และสามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงได้ [40]

Chen และคณะผู้วิจัยได้พัฒนาอะลูมิเนียมเชิงซ้อนออกไซด์นาโนโรดอาร์เรย์ โดยใช้วิธี electrodeposition ซึ่งได้ค่าการดูดกลืนแสงอาทิตย์ 0.95 โครงสร้างนาโน 1 มิติ ทำให้ CuO มีลักษณะเหมือนเส้นใยนาโนและเข็มนาโนส่งผลให้ได้ค่าการดูดกลืนแสงสูง [41]

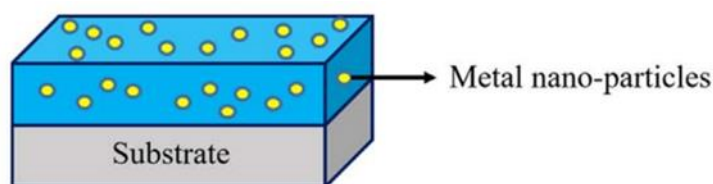
2.4.5 Dielectric-metal-dielectric (DMD)



รูปที่ 13 dielectric-metal-dielectric (DMD) [28]

ทฤษฎีแสงของเรย์ เกี่ยวกับการดักแสงโดยใช้การสะท้อนหลายๆครั้ง (ในกรณีที่ทำเป็นโครงสร้างหลายชั้นหรือการปรับปรุงพื้นผิวใหม่) กลายเป็นวิธีแบบดั้งเดิมแล้ว อีกทั้งในช่วงความยาวคลื่นสูงสารเคลือบเหล่านี้ทำให้เกิดการสะท้อนกลับจากพื้นผิวด้านหลัง เพื่อลดการสูญเสียแสงสะท้อนที่ความยาวคลื่นสูงๆได้อย่างมีประสิทธิภาพ โครงสร้าง DMD ซึ่งเป็นสารเคลือบอีกชนิดสามารถนำมาใช้เพื่อปรับปรุงการดูดซับโดยใช้ Surface Plasmon Polaritons (SPPs) [42, 43] SPPs ช่วยการกระเจิงแสงสามารถปรับแต่งได้ให้มีมุมการกระเจิงแสงที่กว้างขึ้นได้ สามารถช่วยลดปัญหาการสะท้อนกลับจากพื้นผิวด้านหลังและเพิ่มการดูดกลืนพลังงานเนื่องจากสูญเสียความร้อนน้อยอีกด้วย ข้อได้เปรียบที่สำคัญของการเคลือบดังกล่าวคือใช้วัสดุปริมาณน้อยซึ่งช่วยลดต้นทุนการผลิต แต่เนื่องจากมีความเกี่ยวข้องเรื่องความเสถียรที่อุณหภูมิสูงจึงจำเป็นต้องมีวัสดุอิเล็กทรอนิกส์ nanocrystalline หรือ amorphous dielectric (Cr_2O_3 , MgO , Al_2O_3) ที่มีความเสถียรสูงมาช่วย เช่น โลหะ Cr, Mo, Al, Pt โดยพื้นฐานต้องมีคุณสมบัติจุดหลอมเหลวสูงและความต้านทานต่อการออกซิเดชันที่อุณหภูมิสูง จึงที่เหมาะสมสำหรับใช้เป็นชั้น DMD

2.4.6 Cermet composite



รูปที่ 14 cermet composite [28]

เซอรัมคือคอมโพสิตโลหะ-ไดอิเล็กทริก ประกอบด้วยอนุภาคโลหะระดับนาโนในเมทริกซ์อิเล็กทรอนิกส์หรือเซรามิก การเคลือบหลายชั้นของเซอรัมนั้นมีความคล้ายคลึงกับวัสดุอิเล็กทรอนิกส์ทั้งในโครงสร้างและการดูดซับพลังงานแสงอาทิตย์โดยโลหะทำหน้าที่เป็นตัวสะท้อนแสงอินฟราเรด แสงจาก

ดวงอาทิตย์จะกระจายอยู่ในเฟสอิเล็กทริกเป็นผลทำให้ค่าการดูดกลืนแสงเพิ่มขึ้น [44] แสงถูกดักจับในเซออร์เมทเกิดขึ้นจากผลของ quantum confinement หรือเรียกอย่างหนึ่งว่า ปรากฏการณ์พื้นผิวพลาสมอนเรโซแนนซ์ (surface plasmon resonance phenomenon, SPR) [45] SPR คือการสั่นของอิเล็กตรอนจากการนำความร้อนของอนุภาคนาโนโลหะในเมทริกซ์ไดอิเล็กทริกเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพทางแสงและเสถียรภาพทางความร้อนนักวิจัยได้พัฒนาเซออร์เมทที่มี 4 ชั้นประกอบด้วย 1. ชั้นโลหะ infrared reflective (IR-mirror) 2. ชั้นเซออร์เมทโลหะปริมาณสูง (HMFV) 3. ชั้นเซออร์เมทโลหะปริมาณต่ำ (LMVF) และ 5. ชั้น anti-reflective (AR) [46]

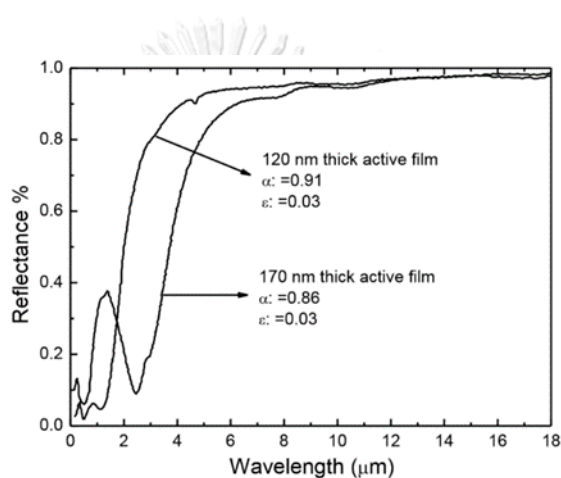
โดยจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ามี การนำเซออร์เมทหลากหลายชนิดเพื่อนำมาสร้างเป็นฟิล์มบางของ SSA เนื่องจากมีกระบวนการสังเคราะห์ที่ไม่ซับซ้อน มีราคาต้นทุนการผลิตที่ต่ำ มีความสามารถในการดูดกลืนแสงที่สูง ค่าการปลดปล่อยความร้อนต่ำ อีกทั้งยังตัวดูดซับแบบจำเพาะชนิดเซออร์เมทมีความเสถียรเหมาะสำหรับการใช้งานที่อุณหภูมิสูง (มากกว่า 400°C) [47] แสดงได้ดังตารางที่ 1

McDonald และคณะผู้วิจัยได้ทำการสังเคราะห์แบล็คโคเคียมคอมโพสิต $\text{Cr-Cr}_2\text{O}_3$ บน Al หรือ Ni ซับสเตรท ทำการเตรียมแบล็คโคเคียมด้วยวิธีการชุบด้วยไฟฟ้าบนท่อขนาด 2 ฟุต x 4 ฟุต ได้ค่าการดูดกลืนแสงเท่ากับ 0.868 และค่าปล่อยพลังงานความร้อนเท่ากับ 0.088 และสามารถทนอุณหภูมิได้ถึง 300 °C [48]

อลูมิเนียมไนไตร (AlN) มีความคงทนทางความร้อนและทางเคมีสูงจึงได้รับความสนใจในการนำมาทำเป็นอิเล็กทริกสำหรับตัวดูดซับรังสีดวงอาทิตย์ชนิดเซออร์เมท Zhang และคณะผู้วิจัยได้ศึกษาการเคลือบ W-AlN ใช้วิธี Sputtering บนกระจก และมีชั้นป้องกันการสะท้อนแสงอยู่ด้านบนของชั้น AlN ซึ่งการเคลือบชั้นป้องกันการสะท้อนแสงช่วยให้ได้ค่าการดูดกลืนแสงเท่ากับ 0.939 และค่าการแผ่รังสีความร้อนเท่ากับ 0.039 [49]

อะมอร์ฟัสซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) ในอดีตนิยมใช้เป็นชั้นป้องกันการสะท้อนแสง โดยมีโลหะ Cu, Ag, Au, Ni และ Mo ที่ฝังอยู่ด้านใน SiO_2 มีคุณสมบัติดูดซับแสงในช่วงความยาวคลื่นระหว่าง 0.3 – 2.5 μm จึงเหมาะสมสำหรับใช้เป็นตัวดูดซับรังสีจากดวงอาทิตย์แบบจำเพาะ Garnich และคณะผู้วิจัยทำการสังเคราะห์ Cu- SiO_2 โดยใช้วิธี evaporation โดยทำเป็นโครงสร้างที่ประกอบด้วยชั้นการดูดซับสองชั้นเพื่อป้องกันการสลายตัวของ Cu- SiO_2 ที่อุณหภูมิสูง ประกอบด้วยชั้นที่มีปริมาณโลหะมาก (HMFV) และชั้นที่มีปริมาณโลหะน้อย (LMVF) และมีชั้น SiO_2 ป้องกันการสะท้อนของแสงช่วยให้ได้ค่าการดูดกลืนแสง 0.911 และค่าการปลดปล่อยความร้อนที่ 0.0196 [50] Okuyama และคณะผู้วิจัยเตรียมเซออร์เมท Ni - SiO_2 โดยใช้วิธี co-evaporation โดยกำหนดให้ชั้น Ni - SiO_2 มีความหนา 87nm และมีชั้น SiO_2 เพื่อป้องกันการสะท้อนแสงโดยมีความหนา 73 nm พบว่าเป็นความหนาที่เหมาะสมสำหรับใช้เป็นตัวดูดซับพลังงานงานแสงอาทิตย์ แสดงให้เห็นถึงคุณสมบัติทาง

แสงที่ดีด้วยการดูดซับแสงสูงในช่วง visible และสะท้อนสูงในช่วง IR ช่วยให้ได้ค่าการดูดกลืนแสงเท่ากับ 0.90 และค่าการแผ่รังสีความร้อนเท่ากับ 0.07 [51] Farooq และคณะผู้วิจัยได้ใช้เทคนิค copatterning ในการเตรียมเซอร์เมท Ni - SiO₂ และศึกษาอิทธิพลของความหนาฟิล์มที่มีผลต่อประสิทธิภาพการเลือกสเปกตรัมในการดูดกลืนแสง พบว่าเมื่อฟิล์มมีความหนาเพิ่มขึ้นค่าการดูดกลืนแสงจะลดลงอาจเป็นเพราะพื้นที่ผิวที่มีความขรุขระมากขึ้น สเปกตรัมการสะท้อนแสงของพื้นผิว Ni - SiO₂ จะชี้ไปที่ความยาวคลื่นยาวกว่าเมื่อเทียบกับแบบฟิล์มบาง [52] จากรูปที่ 15 จะเห็นได้ว่าเส้นสเปกตรัมการสะท้อนแสงของฟิล์มที่หนากว่าจะชี้ไปที่ช่วงความยาวคลื่นที่มากกว่าส่งผลให้ได้ค่าการดูดกลืนแสงที่ต่ำกว่าแบบฟิล์มบาง



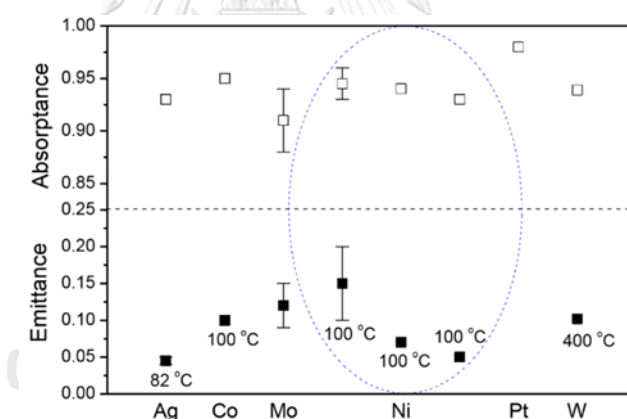
รูปที่ 15 แสดงสเปกตรัมการสะท้อนแสงของตัวดูดซับพลังงานแสงอาทิตย์ Ni - SiO₂ โดยมีความหนาของฟิล์มที่ต่างกัน [52]

เซอร์เมทชนิดอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al₂O₃) ได้รับการตรวจสอบอย่างแพร่หลายว่ามีคุณสมบัติทางแสงที่ดีเยี่ยมและมีความเสถียรทางความร้อนที่สูงกว่าเซอร์เมทชนิดอื่น [53] Craighead และคณะผู้วิจัยนำ RF magnetron sputtering ใช้เตรียม Ni - Al₂O₃ (ความหนา 65 nm) บนซับสเตรตสแตนเลสที่เคลือบด้วยโมลิบดีนัมและมีชั้นบนสุดเป็น SiO₂ พบว่าให้ค่าการดูดซับพลังงานแสงอาทิตย์ 0.94 และค่าการแผ่รังสีความร้อน 0.07 และมีความเสถียรทางความร้อนในอากาศถึง 500°C [54]

Boström ได้สังเคราะห์สารเคลือบ Ni - Al₂O₃ โดยใช้ Solution-chemical เตรียมลงบนซับสเตรต Al โดยมีปริมาณนิกเกิล 65% มีความหนาของฟิล์ม 0.1 μm และมีขนาดของอนุภาคประมาณ 10 nm พบว่าค่าการดูดกลืนพลังงานแสงอาทิตย์ยังไม่เพียงพอ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเลือกสเปกตรัมจึงเพิ่มชั้นป้องกันแสงสะท้อนกลับคือฟิล์มชนิดซิลิกาไฮบริดซิลิกาหรืออลูมินาด้วยวิธีโซลเจล (sol-gel) หลังจากการเคลือบและเผาที่อุณหภูมิ 580°C พบว่าได้ค่าการดูดกลืนสูงถึง 0.93 และค่าการแผ่รังสี

ความร้อนเท่ากับ 0.03 โครงสร้างสัณฐานวิทยาของ Ni - Al₂O₃/SiO₂ พบว่าขนาดอนุภาคโลหะ Ni ที่กระจายตัวอยู่ใน Al₂O₃ จะอยู่ในช่วง 3-4 nm และการเพิ่มขึ้นป้องกันการสะท้อนจะช่วยหลีกเลี่ยงการเกิด Micro-cracking ได้อีกด้วย [55] กระบวนการ Solution-chemical มีข้อดีหลายประการ เช่นต้นทุนต่ำกว่า ความเป็นพิษน้อยกว่า Li และคณะผู้วิจัยพบว่าการเคลือบ 3 ชั้นประกอบด้วยชั้นการดูดซับแสง 2 ชั้นและชั้นป้องกันการสะท้อน 1 ชั้น ช่วยให้ SSA มีค่าการดูดซับพลังงานแสงอาทิตย์สูงขึ้น และค่าการปลดปล่อยความร้อนต่ำแบบ 2 ชั้น [12]

นอกจาก Ni แล้วยังมีการใช้โลหะอื่นๆ เช่น Ag, Co, Mo, Ni, Pt และ W เพื่อใช้ร่วมกับเมทริกซ์ Al₂O₃ ได้ค่าดูดซับพลังงานแสงอาทิตย์และค่าการแผ่รังสีความร้อนของที่ต่างกัน แสดงดังรูปที่ 16 ในบรรดาโลหะทั้งหมด Ag - Al₂O₃ แสดงให้เห็นถึงการปลดปล่อยความร้อนต่ำ ที่ 82°C และ W - Al₂O₃ แสดงให้เห็นถึงการปลดปล่อยความร้อนประมาณ 0.1 ที่ 400°C ตัวดูดซับพลังงานแสงอาทิตย์ที่ให้ค่าการดูดซับสูงสุดคือ Pt - Al₂O₃ และ Ni - Al₂O₃ ที่อยู่ในเครื่องหมายวงรีแสดงค่าดูดซับพลังงานแสงอาทิตย์และค่าการแผ่รังสีความร้อนที่แตกต่างกันตามเทคนิคที่ใช้เตรียมพบค่าการแผ่รังสีความร้อนสูงสุด 0.1-0.2 และค่าการดูดซับพลังงานแสงอาทิตย์อยู่ที่ประมาณ 0.88-0.98 [56]



รูปที่ 16 แสดงค่าการดูดซับพลังงานแสงอาทิตย์และค่าการปล่อยพลังงานงานความร้อนของ SSA โดยมีโลหะต่างชนิดกัน Ag, Co, Mo, Ni, Pt และ W ที่อยู่ในเมทริกซ์ Al₂O₃ [56]

ตารางที่ 1 แสดงตัวดูดซับรังสีแสงอาทิตย์แบบจำเพาะชนิดเซอร์เมท โดยมีชนิดของเมทริกซ์, ชนิดโลหะ, ชั้นสเตรท และวิธีการเคลือบฟิล์มที่แตกต่างกัน พร้อมแสดงค่าการดูดกลืนแสง และค่าการปล่อยพลังงานความร้อน

เมทริกซ์	โลหะ	วิธีการเตรียม	ชั้นสเตรท	เสถียรภาพ	ค่าการดูดกลืนแสง	ค่าการปล่อยรังสีความร้อน	Ref.
Cr ₂ O ₃	Cr	electroplating	Al	-	0.868	0.088	[48]
AlN	W	sputtering	กระจก	500°C ในสุญญากาศ	0.939	0.039	[49]
SiO ₂	Cu	evaporation	Cu	-	0.911	0.0196	[50]
SiO ₂	Ni	co-evaporation	quartz	500°C ในสุญญากาศ	0.90	0.07	[51]
SiO ₂	Ni	copatterning	quartz	-	0.96	0.14	[52]
Al ₂ O ₃	Ni	sputtering	stainless steel	500°C ในอากาศ	0.94	0.07	[54]
Al ₂ O ₃	Ni	solution-chemical	Al	-	0.93	0.03	[55]

2.5 วิธีการเตรียมตัวดูดซับรังสีความร้อน

ในการสังเคราะห์สารเคลือบสำหรับตัวดูดซับแสงดวงอาทิตย์แบบจำเพาะ (SSA) ทำได้หลายวิธี กระบวนการสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กระบวนการหลักๆ คือ การใช้ระบบ Vacuum เช่น electroplating, anodizing, evaporation, chemical vapor deposition (CVD), sputtering เป็นต้น [57]

- Electroplating หรือกระบวนการชุบโดยใช้ไฟฟ้าโดยมีสารละลายโลหะไอออนอยู่ในอ่างจะถูกย้ายโดยใช้สนามไฟฟ้าเพื่อทำการเคลือบอิเล็กโทรด โครงสร้างและองค์ประกอบของการเคลือบขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ต่อไปนี้ เช่น ความเป็นกรดของสารละลาย, ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า, ระยะเวลาในการสะสมและอุณหภูมิ จุดเด่นของเทคนิคนี้คือ การเคลือบเหมาะสำหรับการผลิตขนาดใหญ่ แต่ข้อเสียของเทคนิคนี้มีมากมาย เช่น พารามิเตอร์ของเทคนิคนี้ทำให้การทำซ้ำแต่ละครั้งควบคุมได้ยากและมีข้อจำกัดคือต้องเคลือบบนพื้นผิวตัวนำเท่านั้น

- Anodizing คือกระบวนการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้าซึ่งโลหะถูกใช้เป็นขั้วแอโนดอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์เมื่อมีกระแสไฟฟ้าผ่านสารละลายอิเล็กโทรไลต์พื้นผิวของโลหะจะถูกปกคลุมไปด้วยออกไซด์ และเกิดเป็นออกไซด์ฟิล์ม คุณสมบัติของฟิล์มขึ้นอยู่กับ การเลือกพารามิเตอร์เช่น องค์ประกอบของสารอิเล็กโทรไลต์, ความเป็นกรด, อุณหภูมิ และเวลา เป็นต้น จุดเด่นของเทคนิคนี้คือ มีการยึดเกาะที่ดี มีความต้านทานการเสียดสีสูง และเฉื่อยต่อปฏิกิริยาเคมีในสิ่งแวดล้อมต่างๆ ที่มีผลต่อการกัดกร่อน แต่มีข้อเสียคือการทำปฏิกิริยาเคมี ซึ่งมีทั้งกระแสไฟฟ้า สารเคมี และอุณหภูมิ ซึ่งยากต่อการควบคุมให้เหมาะสม

- Evaporation คือกระบวนการทำให้เป็นไอด้วยความร้อนในสุญญากาศ อะตอมหรือโมเลกุลจะควบแน่นลงบนซับสเตรท โครงสร้างและลักษณะพื้นผิวของการเคลือบผิวผลลัพธ์ขึ้นอยู่กับอัตราการระเหยของสารตั้งต้น, อุณหภูมิ, ระยะห่างระหว่างซับสเตรทและไอระเหย จุดเด่นของเทคนิคนี้คือสามารถควบคุมความหนาได้อย่างแม่นยำ แต่เทคนิคนี้มีข้อเสียคือ เทคนิคนี้ต้องใช้อุปกรณ์สุญญากาศซึ่งมีราคาสูง และผู้ใช้ต้องมีความเชี่ยวชาญในการใช้งาน

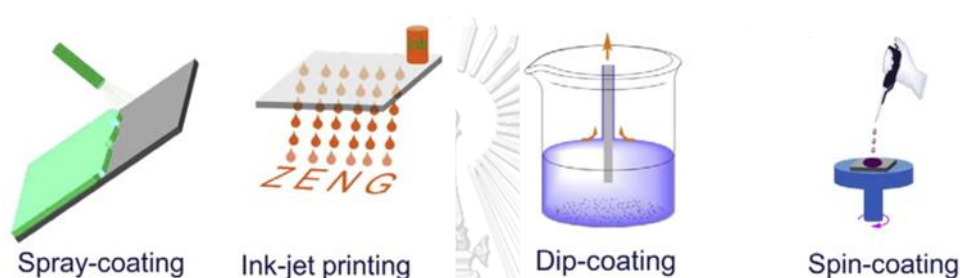
- Chemical vapor deposition (CVD) คือกระบวนการเคลือบที่อาศัยพลังงานความร้อนเป็นตัวก่อให้เกิดปฏิกิริยาเคมีในการสังเคราะห์สารเคลือบ จุดเด่นของเทคนิคนี้คือสามารถสร้างสารเคลือบผิวที่บางและแข็งเกาะติดกับพื้นผิวได้อย่างดี แต่พบว่ามีข้อเสียคือ ไม่สามารถควบคุมความหนาฟิล์มได้อย่างแม่นยำ แก๊สที่ใช้ทำปฏิกิริยาและผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยามักเป็นพิษ

- Sputtering คือกระบวนการที่ทำให้อะตอมของสารตั้งต้น (sputtering target) หลุดออก โดยทำให้ก๊าซเฉื่อยที่ป้อนเข้ามาบริเวณผิวหน้าของสารตั้งต้นเกิดสภาวะพลาสมา และไอออนของก๊าซเฉื่อยที่เกิดขึ้นจะเข้าชนผิวของสารตั้งต้นให้หลุดออกอย่างต่อเนื่องเกิดเป็นไอของสารตั้งต้น และ

เคลื่อนที่ไปเรียงตัวที่ผิวของ สับสเตรท จุดเด่นของเทคนิคนี้คือฟิล์มเคลือบจะมีความสม่ำเสมอทั่วซบสเตรท ข้อเสียของเทคนิคนี้คือราคาสูงและมีค่าใช้จ่ายในขั้นตอนการทำงาน

วิธีที่กล่าวมาข้างต้นล้วนเป็นวิธีที่ต้องควบคุมความดัน อุณหภูมิหรืออัตราการไหลของก๊าซ ซึ่งแต่ละกระบวนการมีขั้นตอนที่ซับซ้อนใช้เวลานานและต้นทุนสูง ซึ่งมีอีกหนึ่งวิธีคือวิธีการเตรียมด้วยสารละลาย (Solution-chemical) พบว่ามีข้อดีหลายประการเช่น ราคาต้นทุนต่ำ, ใช้งานได้ง่าย, และ

สามารถขยายเป็นสเกลใหญ่ได้ง่ายกว่ามีหลากหลายวิธีดังต่อไปนี้ spray-coating, Ink-jet printing, dip-coating, spin-coating [57] ดังรูปที่ 17



รูปที่ 17 แสดงวิธีการสร้างตัวดูดซับพลังงานแสงอาทิตย์แบบจำเพาะ (SSA) จากกระบวนการเตรียมสารละลาย (Solution process) [58]

- Spray-coating คือการเคลือบแบบสเปรย์โดยมีอุปกรณ์จะพ่นสารเคลือบผ่านอากาศลงบนพื้นผิว ซึ่งเป็นเทคนิคที่รู้จักกันดีว่าใช้งานง่ายเครื่องมือไม่มีความซับซ้อน จุดเด่นของเทคนิคนี้คือสามารถนำไปใช้ได้กับทุกพื้นผิวของรูปทรงต่างๆ ต้นทุนต่ำ แต่ข้อเสียของเทคนิคนี้คือ ควบคุมความสม่ำเสมอของฟิล์มได้ยาก

- Ink-jet printing เป็นเทคนิคการวางฟิล์ม โดยอาศัยการป้อนข้อมูลให้ระบบปฏิบัติการซอฟต์แวร์ ซึ่งถือเป็นจุดเด่นของเทคนิคชนิดนี้ และสามารถวางฟิล์มได้หลายรูปแบบ ใช้ต้นทุนในการผลิตที่ต่ำ ข้อเสียของเทคนิคนี้คือ การทำฟิล์มที่มีขนาดใหญ่ทำได้ยากและใช้ต้นทุนสูงในการทำซอฟต์แวร์

- Dip Coating หรือการเคลือบแบบจุ่ม เป็นวิธีการหนึ่งของการประยุกต์ใช้ในการเตรียมฟิล์มบาง โดยอาศัยหลักการเคลือบสารละลายบนพื้นผิวอย่างช้าๆ การจุ่มจะนำสารละลายมาเคลือบบนพื้นผิวอย่างช้าๆ ซึ่งต้องควบคุมความเร็วในการดึงให้คงที่เพื่อให้ผิวของวัสดุมีความเรียบสม่ำเสมอและความหนาของฟิล์มน้อย หากต้องการฟิล์มที่มีความหนาน้อยให้ใช้ความเร็วในการเคลือบแบบจุ่มเร็ว แต่ถ้าต้องการเคลือบแบบหนามากให้ใช้ความเร็วที่ช้า หรือจะทำการจุ่มหลายๆครั้งเพื่อเพิ่มความหนาให้กับ

ฟิล์มได้เช่นกัน จุดเด่นของเทคนิคนี้คือ ได้ฟิล์มที่เรียบสม่ำเสมอแต่พบว่าในกรณีที่ต้องเคลือบฟิล์มที่มีขนาดใหญ่ฟิล์มจะเริ่มมีความไม่สม่ำเสมอ และอาจต้องใช้สารปริมาณมากทำให้เกิดการสิ้นเปลือง

- Spin-coating คือการหยดสารที่ต้องการเคลือบซึ่งเป็นของเหลวลงบนจานหมุนและอาศัยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางทำให้สารเคมีแผ่ออกเป็นฟิล์มบาง โดยชั้นสเตรตจะถูกหมุนเหวี่ยงรอบแกนซึ่งตั้งฉากกับบริเวณที่จะถูกเคลือบฟิล์มบาง ตัวหมุนเหวี่ยงหรือสปินเนอร์นี้จะถูกออกแบบให้ใช้สำหรับการเคลือบของเหลวฟิล์มบางบนชั้นสเตรตที่ต้องใช้ความเร็วสูงในการหมุน ของเหลวเกิดการแผ่กระจายกลายเป็นฟิล์มบางเกิดขึ้นบนชั้นสเตรต ซึ่งความหนาของฟิล์มบางจะถูกควบคุมด้วยความเร็วที่ใช้ในการหมุน เวลาที่ใช้ในการหมุน จุดเด่นของเทคนิคนี้คือสามารถปรับความหนาของฟิล์มได้ ฟิล์มที่ได้มีความสม่ำเสมอ และมีต้นทุนต่ำ ข้อเสียของเทคนิคนี้คือ วัสดุที่มีขนาดใหญ่ไม่สามารถหมุนในอัตราเร็วมากพอที่จะให้ฟิล์มบางได้ และในกระบวนการเคลือบมีเพียง 2-5% เท่านั้นที่ถูกใช้ในขณะ 95-98% ที่เหลืออยู่ถูกเหวี่ยงออกไปในขณะเคลือบ ส่งผลให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายอย่างมากในการกำจัด

ดังนั้นกระบวนการในการสร้างฟิล์มบางในระดับนาโนจึงเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณาจากมุมมองของกระบวนการผลิตฟิล์มบางส่วนใหญ่มักนิยมใช้วิธี เช่นการสเปรย์, การเคลือบแบบการพิมพ์สกรีน, การเคลือบแบบจุ่ม, ในบรรดาเทคนิคการเคลือบเหล่านี้การเคลือบแบบหมุนเหวี่ยงเป็นเทคนิคที่ได้รับความนิยมในการเตรียมฟิล์มบางมากที่สุด เพราะให้ฟิล์มบางที่มีความสม่ำเสมอสูงและมีความหนาที่สามารถควบคุมได้อย่างเต็มที่ อย่างไรก็ตามพบข้อบกพร่องหลายประการเช่น มีสารปริมาณมาก (> 90%) ที่สูญเสียระหว่างการผลิตและวิธีนี้ไม่เหมาะสำหรับการผลิตในพื้นที่ขนาดใหญ่ ดังนั้นการพัฒนาวิธีการเคลือบฟิล์มบางเพื่อแก้ปัญหาจึงมีความสำคัญและการผลิตแผ่นฟิล์มบางที่สม่ำเสมอในพื้นที่ขนาดใหญ่สิ่งที่น่าสนใจ

มีอีกเทคนิคหนึ่งซึ่งจะสามารถกำจัดปัญหาเหล่านั้นได้เรียกว่า “convective deposition” เป็นกระบวนการที่เหมาะสมที่จะนำไปใช้สำหรับการเตรียมฟิล์มบางในระดับนาโนเมตร โดยใช้สารปริมาณน้อยมากเมื่อเทียบกับเทคนิคการหมุนเหวี่ยง โดยทั่วไปวิธีนี้ถูกใช้เพื่อสร้างชั้นฟิล์มจากการนำพาและมารวมกันของอนุภาคคอลลอยด์หรืออนุภาคระดับนาโน แสดงในรูปที่ 3 [11]

2.6 อนุภาคนาโนนิกเกิล

อนุภาคนาโนนิกเกิลที่มีสายโซ่ยาวหรือนิกเกิลนาโนเซนคือ อนุภาคนาโนนิกเกิลมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 nm หรือใหญ่กว่าเรียงต่อกัน ขนาดของอนุภาคนาโนเป็นตัวช่วยคัดเลือกการดูดซับและการกระเจิงในสเปกตรัมพลังงานแสงอาทิตย์ให้เพิ่มขึ้น โดยใช้แสงกระตุ้นพลาสมาของ surface plasma polaritons (SPPs) ในโครงสร้างของโลหะนาโนซึ่ง plasmonic resonances ของพวกโลหะมีตระกูล (เช่น Au, Ag) แคบเกินไปที่จะครอบคลุมสเปกตรัมพลังงานแสงอาทิตย์ทั้งหมด

ตรงข้ามกับโลหะประเภท ferromagnetic เช่น Ni มีค่าสัมประสิทธิ์การทำให้ขึ้นสูง ดังนั้น SPP จะสะท้อนในช่วงสเปกตรัมที่กว้างขึ้น [59] คุณสมบัติเช่นนี้มีประโยชน์อย่างมากสำหรับตัวดูดซับพลังงานแสงอาทิตย์ นอกจากนี้การตอบสนองต่อแสงสามารถปรับได้โดยการปรับความยาวของนิกเกิลนาโน เช่น โครงสร้างของนิกเกิลนาโนเซมมีลักษณะเป็นสายโซ่ยาวต่อกันเป็นโครงข่าย 3 มิติ จึงเกิดการกระเจิงแสงหลายครั้งส่งผลให้ค่าการดูดซับพลังงานแสงอาทิตย์โดยรวมเพิ่มขึ้น ในอีกแง่หนึ่งเส้นผ่านศูนย์กลางของนิกเกิลนาโนพาร์ติเคิลขนาด 100 นาโนเมตร นั้นมีขนาดเล็กพอสำหรับช่วงความยาวคลื่น long โฟตอน MIR ที่มาจากกการแผ่รังสีความร้อนเมื่อเจอกับโครงข่ายที่เชื่อมต่อกันของนิกเกิลนาโนเซมโฟตอนจะถูกส่งกลับลงไปเพื่อลดการสูญเสียความร้อน [60]

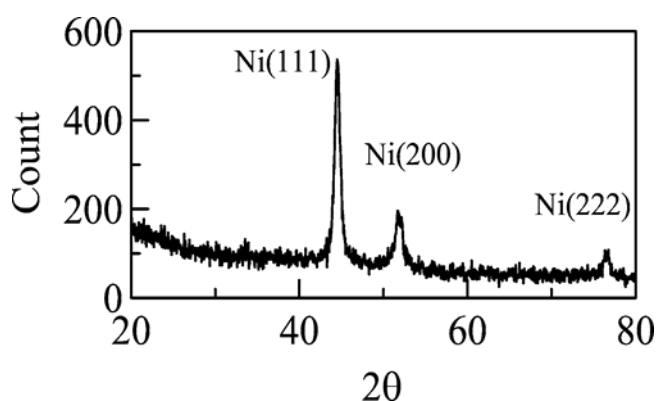
เพื่อลดปัญหาและข้อจำกัดแบบเดิมเรื่องความหนาของเซอเมท การเลือกใช้นิกเกิลนาโนเซม แสดงให้เห็นถึงการเลือกสเปกตรัมที่เหมาะสมสำหรับการใช้ในระบบ CPS แทนการออกแบบความหนาของชั้นเซอเมทซึ่งทำได้ยากกว่า

2.6.1 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนนิกเกิล

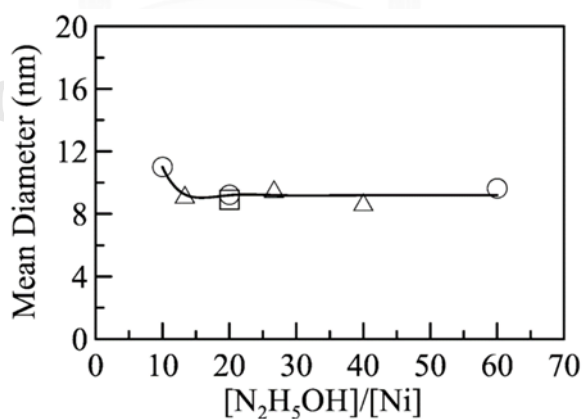
ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมาการสังเคราะห์อนุภาคโลหะนาโนในรูปแบบของผงได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากมีสมบัติทางอิเล็กทรอนิกส์, แม่เหล็ก, และคุณสมบัติทางแสงที่ดี โดยทั่วไปแล้วผงโลหะนาโนสามารถสังเคราะห์ได้จากหลายวิธี เช่น hydrothermal reduction, microemulsion, chemical reduction at acidic pH และ electrochemical reduction และการควบคุมขนาดของอนุภาคนาโนนั้นเป็นสิ่งสำคัญมากเนื่องจากมีผลโดยตรงต่อคุณสมบัติต่างๆของอนุภาคนาโน การเตรียมอนุภาคโลหะนิกเกิลนาโนโดยปฏิกิริยารีดักชันโดยใช้ไฮดราซีนเป็นตัวรีดิวซ์เป็นวิธีที่เรียบง่าย ราคาไม่แพง และเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการสังเคราะห์นิกเกิลให้มีขนาดนาโน

Dong-Hwang Chen และคณะผู้วิจัยพบว่าไอออนนิกเกิลที่อยู่ในสารละลายเอธิลีนไกลคอล (EG) ถูกรีดิวซ์ด้วยไฮดราซีน (N_2H_4) เกิดเป็นอนุภาคนาโนนิกเกิล และจากการทดลองเบื้องต้นการวิเคราะห์ผลึกด้วย XRD ไม่ปรากฏตำแหน่งของสัญญาณออกไซด์หรือไฮดรอกไซด์ เช่น NiO , Ni_2O_3 , $Ni(OH)_2$ แสดงดังรูปที่ 18 เนื่องจากเหตุผล 2 ประการ 1. ปฏิกิริยาเกิดขึ้นในตัวทำละลายอินทรีย์ 2. พบว่ามีก๊าซ N_2 และเกิดฟองอากาศอย่างต่อเนื่องในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาซึ่งเสมือนเป็นการสร้างสภาวะก๊าซเฉื่อยด้วยเหตุผลนี้จึงไม่จำเป็นที่จะต้องใส่ก๊าซ N_2 เข้าไปสำหรับการสังเคราะห์อนุภาคนาโนนิกเกิลบริสุทธิ์ ผลของความเข้มข้นของนิกเกิลคลอไรด์และไฮดราซีนต่อขนาดอนุภาคแสดงดังรูปที่ 19 พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของ $[N_2H_5OH]/[NiCl_2]$ เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของอนุภาคนิกเกิลนาโนลดลงแต่แทบจะไม่เปลี่ยนแปลง แต่เมื่อ $([N_2H_5OH]/[NiCl_2]) < 12$ จะเกิดเป็นนิกเกิลอนุภาคขนาดใหญ่เนื่องจากอัตราการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของนิกเกิลคลอไรด์ช้าและมีนิวคลีโอเพียงไม่กี่ตัวในช่วงแรกและอะตอมที่เกิดขึ้นในช่วงเวลานั้นอาจมีส่วนร่วมในการชนกับนิวคลีโอที่เกิดขึ้นส่งผลให้เกิด

การก่อตัวของนิวคลีโอไอใหม่ และที่อัตราส่วนความเข้มข้นของไฮดราซีนต่อนิกเกิลคลอไรด์มีมากพอ ($[\text{N}_2\text{H}_5\text{OH}] / [\text{NiCl}_2] > 12$) อัตราการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของนิกเกิลคลอไรด์นั้นเร็วกว่าอัตราการเกิดนิวคลีโอไอมากและไอออนนิกเกิลเกือบทั้งหมดจะก่อตัวเป็นอะตอมก่อนนิวคลีโอไอจึงได้อนุภาคนาโนนิกเกิลขนาดเล็ก แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนไปมากกว่านี้ขนาดของอนุภาคนาโนจะคงที่เนื่องจากจำนวนของนิวคลีโอไอจะคงที่และไม่มีนิวคลีโอไอใหม่เกิดขึ้นแม้เพิ่มความเข้มข้นของไฮดราซีนขนาดของอนุภาคนาโนจะมีลักษณะเป็น monodispersed เนื่องจากนิวคลีโอไอส่วนใหญ่ก่อตัวขึ้นในเวลาเดียวกันและเติบโตในอัตราเดียวกัน และพบว่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิมีประโยชน์มากในการเร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาอีกทั้งยังพบว่าการเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เป็นสิ่งจำเป็นต่อการก่อตัวของอนุภาคนิกเกิลนาโนแต่ยังต้องมีการศึกษาเพิ่มเติม [61]



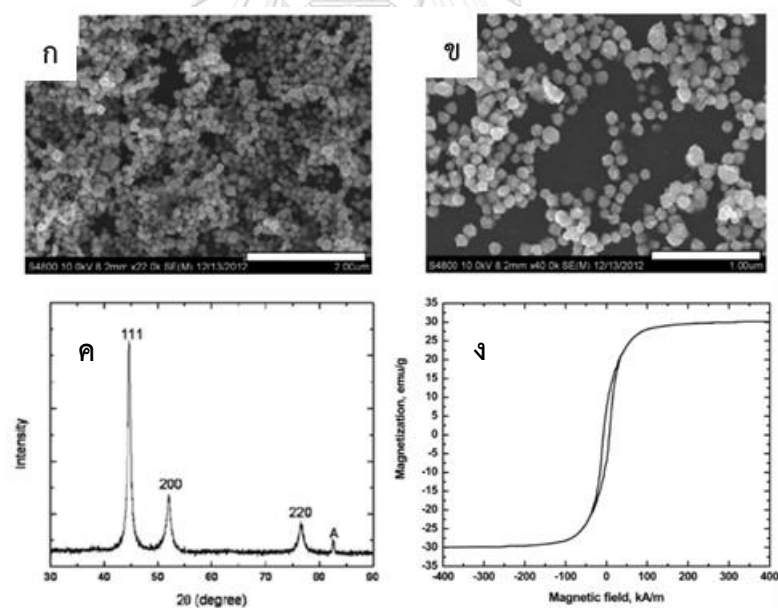
รูปที่ 18 โครงสร้างผลึกของอนุภาคนาโนนิกเกิลโดย $[\text{NiCl}_2] = 5.0 \text{ mM}$ $[\text{N}_2\text{H}_5\text{OH}] = 0.1 \text{ M}$ [61]



รูปที่ 19 แสดงผลกระทบของความเข้มข้นของนิกเกิลคลอไรด์และไฮดราซีนที่มีผลต่อขนาดของนิกเกิลนาโนพาร์ติเคิล (O) $[\text{NiCl}_2] = 5.0 \text{ mM}$ $[\text{N}_2\text{H}_5\text{OH}] = 0.05\text{--}0.3 \text{ M}$; (Δ) $[\text{NiCl}_2] = 2.5\text{--}7.5 \text{ mM}$ $[\text{N}_2\text{H}_5\text{OH}] = 0.1 \text{ M}$; (□) $[\text{NiCl}_2] = 45 \text{ mM}$ $[\text{N}_2\text{H}_5\text{OH}] = 0.9 \text{ M}$. [61]

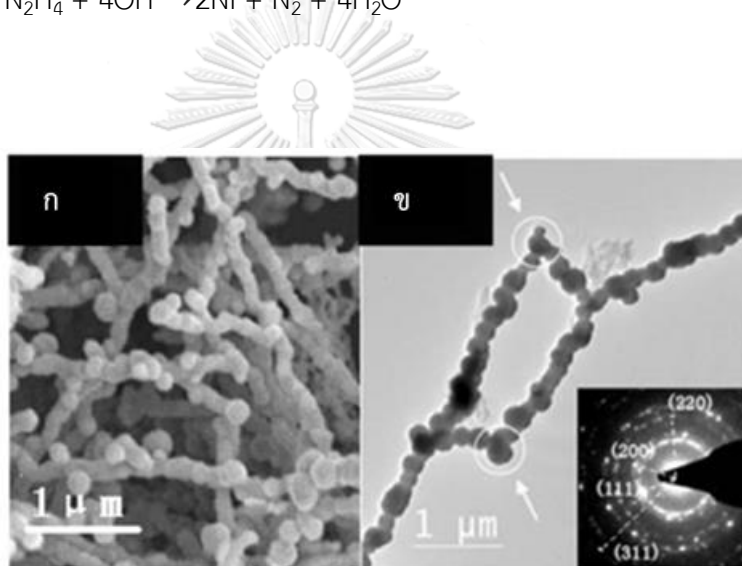
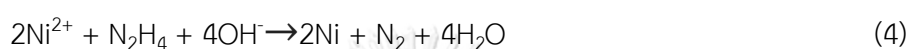
2.6.2 กลไกการเกิดสายโซ่ของอนุภาคนาโนนิกเกิล

James Townsend และคณะผู้วิจัยกล่าวว่าสายโซ่อนุภาคนาโนนิกเกิลเกิดจากการรวมกันของอนุภาคนาโนนิกเกิลซึ่งเกิดจากปฏิกิริยารีดักชันของ NiCl_2 ละลายอยู่ในตัวทำละลาย ethylene glycol (EG) มี NaOH ทำหน้าที่เป็นตัวปรับ pH ของสารละลายและมีไฮดราซีนเป็นตัวรีดิวซ์ เกิดเป็นอนุภาคนาโนนิกเกิลมีลักษณะเป็นทรงกลมมีขนาดประมาณ 100 ± 10 นาโนเมตร แสดงดังรูปที่ 20 (ก ข) บริเวณพื้นผิวของอนุภาคค่อนข้างหยาบโดยทั่วไปจะพบได้ในอนุภาคนาโนนิกเกิลที่สังเคราะห์โดยปฏิกิริยารีดักชัน ข้อมูลความเป็นผลึกของอนุภาคนาโนนิกเกิลแสดงดังรูปที่ 20 (ค) อนุภาคนาโนนิกเกิลมีโครงสร้างเป็น face-centered cubic (fcc) เนื่องจากมีสัญญาณขึ้นสูงที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 44.6 52.0 76.5 องศา และบ่งบอกถึงความเป็นโลหะนิกเกิลบริสุทธิ์ ไม่ปรากฏสัญญาณของนิกเกิลออกไซด์ การวัดค่าแม่เหล็กแสดงดังรูปที่ 20 (ง) แสดงสมบัติเป็นวัสดุประเภท ferromagnetic ด้วยการแสดงค่า magnetization เท่ากับ emu/g และค่า remnant magnetization และ coercivity เท่ากับ 7.1 emu/g and 90 Oe ตามลำดับ โดยค่าที่ได้ของอนุภาคนาโนนิกเกิลจะแตกต่างจากนิกเกิลที่เป็น bulk [62]



รูปที่ 20 (ก, ข) ภาพ SEM ของอนุภาคนาโนนิกเกิลที่สังเคราะห์ได้ (ค) รูปแบบ XRD ของอนุภาคนาโนนิกเกิล (ง) แสดงกราฟระหว่าง Magnetization และ strength magnetic field ของอนุภาคนาโนนิกเกิล [62]

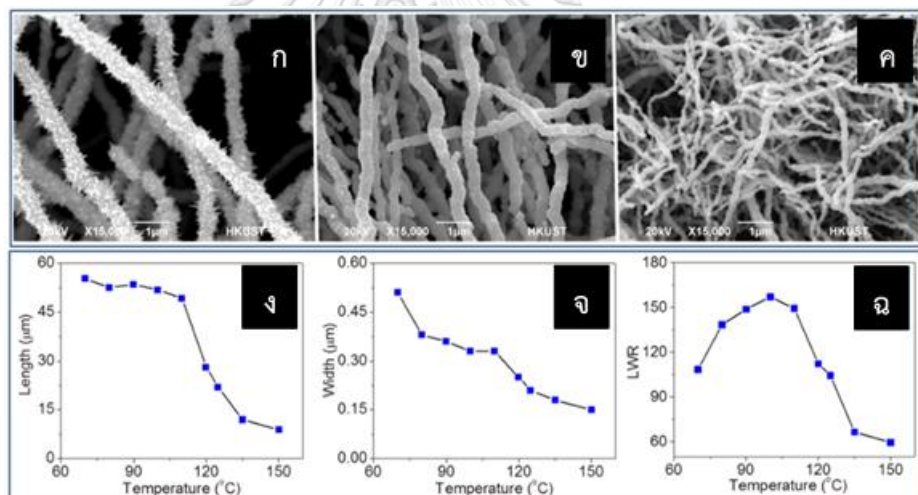
Chen-Min Liu และคณะผู้วิจัยทำการสังเคราะห์อนุภาคนาโนนิกเกิลโดยปฏิกิริยารีดักชันมี $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ละลายอยู่ใน EG และมี N_2H_4 เป็นตัวรีดิวซ์ตั้งสมการที่ 4 พบว่าเริ่มแรกอนุภาคนาโนนิกเกิลขนาดเล็กรวมกันเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ส่งผลให้ความเป็นแม่เหล็กจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากปฏิสัมพันธ์ขั้วแม่เหล็กระหว่างโมเลกุล (magnetic dipole-dipole interaction) อนุภาคนาโนนิกเกิลจึงจัดเรียงตัวมีลักษณะคล้ายสร้อยคอ (necklace-like chains) ที่มีหลายแขนง แสดงดังรูปที่ 21 (ก) โครงข่ายกิ่งอนุภาคนาโนนิกเกิลบางกิ่งอาจมีจุดสิ้นสุดได้เกิดเมื่อมีกิ่งสองกิ่งมาบรรจบกันซึ่งจะเป็นการขัดขวางการเติบโตต่อแสดงดังรูปที่ 21 (ข) [63]



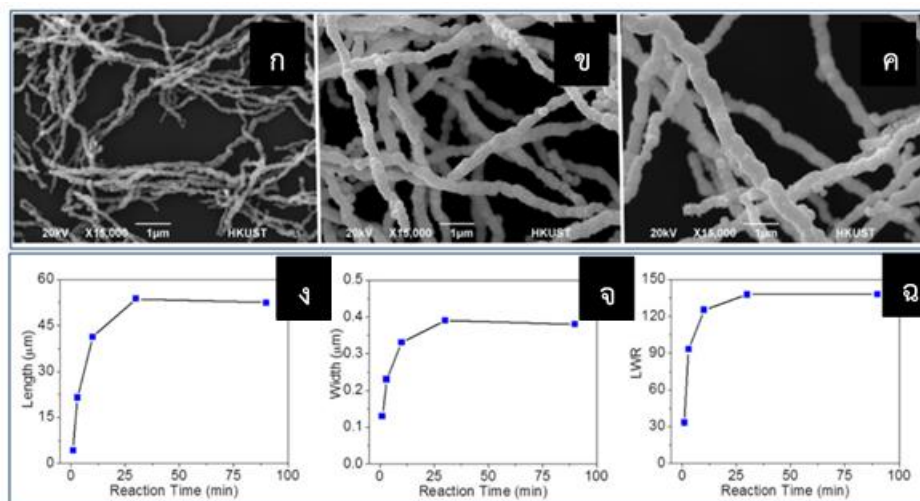
รูปที่ 21 (ก) ภาพ SEM ของสายโซ่อนุภาคนาโนนิกเกิล (ข) ภาพ TEM ของสายโซ่อนุภาคนาโนนิกเกิลและรูปแบบ nano-beam electron diffraction (NBED) ของโครงสร้างผลึกสายโซ่อนุภาคนาโนนิกเกิล [63]

Zengzilu Xia และคณะผู้วิจัย พบว่าอุณหภูมิของการทำปฏิกิริยาสำคัญต่อขนาดและรูปร่างของ Nickel Nanowires (NiNWs) ได้ทำการศึกษาที่อุณหภูมิ 60 70 80 90 100 110 120 125 135 และ 150 °C ภาพ SEM แสดงการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องของ NiNW เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ระยะเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาก็จะสั้นลง ที่อุณหภูมิ 70 °C ใช้เวลาในการเกิด NiNW ประมาณ 100 นาที แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิถึง 150 °C ใช้ระยะเวลาเพียง 5 นาที ในการเกิด NiNW แสดงดังรูปที่ 22 (ก-ค) กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงความยาวเฉลี่ย, ความกว้างเฉลี่ย และอัตราส่วนความยาวกับความกว้าง เมื่อเทียบกับอุณหภูมิแสดงดังรูปที่ 22 (ง-ฉ) จากกราฟพบว่าเมื่อสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ

100 °C จะได้ความยาวของ NiNW สูงสุดและเริ่มลดลงอย่างรวดเร็วเมื่ออุณหภูมิ 125 °C สรุปได้ว่าเมื่อเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่ำ NiNWs ที่ได้จะมีความยาวมากกว่าและขนาดใหญ่กว่าที่อุณหภูมิสูง ในบรรดาพารามิเตอร์ทั้งสามที่กล่าวถึงการเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่ำสามารถให้การเจริญเติบโตที่ชัดเจนของ nanopricks พื้นผิวของ NiNWs เมื่ออุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาสูงกว่า 90 °C จำนวนและขนาดของอนุภาคนาโนจะลดลงอย่างรวดเร็ว และไม่มีการปรากฏตัวของ nanopricks บนพื้นผิวเมื่ออุณหภูมิอยู่ที่ 150 °C การควบคุมระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาของ NiNWs โดยทำการทดลองที่เวลา 1 10 30 90 นาที จากภาพ SEM แสดงดังรูปที่ 23 (ก-ค) สังเกตได้ว่าเวลาเมื่อที่ผลิตอย่างมากต่อขนาดของ NiNWs แต่อาจไม่มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อการก่อตัวของอนุภาคนาโนบนพื้นผิวบน NiNW หลังจาก 1 นาที ความยาวและความกว้างของ NiNWs จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วใน 10 นาทีแรก เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่างอย่างรวดเร็ว แสดงดังรูปที่ 23 (ง-ฉ) จากนั้นการเติบโตจะชะลอตัวลงและในที่สุดก็ไม่มี การเติบโตที่ชัดเจนหลังจากนาที่ที่ 30 [64]



รูปที่ 22 ภาพ SEM ของ NiNWs สังเคราะห์ที่อุณหภูมิต่ำ (ก) 70 °C (ข) 110 °C (ค) 150 °C และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิต่ำกับ (ง) ความยาว (จ) ความกว้าง (ฉ) สัดส่วนความยาวต่อความกว้าง [64]



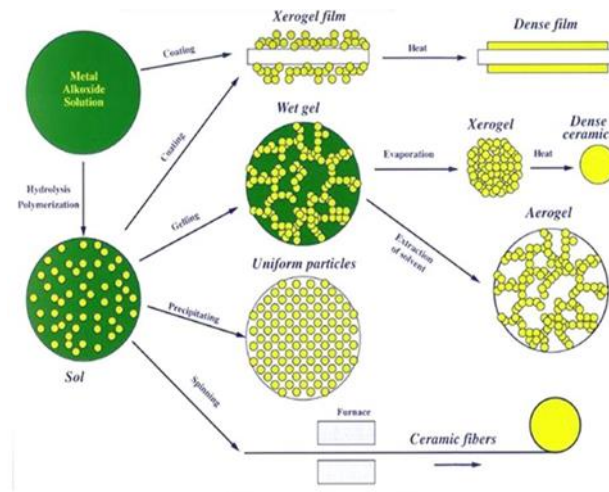
รูปที่ 23 ภาพ SEM ของ NiNWs สังเคราะห์ที่เวลา (ก) 1นาที่ (ข) 10นาที่ (ค) 30นาที่ และกราฟ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการเกิดปฏิกิริยากับ (ง) ความยาว (จ) ความกว้าง (ฉ) สัดส่วนความยาวต่อความกว้าง [64]

2.7 การสังเคราะห์สารละลายอะลูมินา

2.7.1 คุณสมบัติของอะลูมินาที่เหมาะสมสำหรับการนำใช้งานเป็นตัวดูดซับพลังงานแสงอาทิตย์

ประสิทธิภาพการทำงานของวัสดุเหล่านี้โดยทั่วไปขึ้นอยู่กับโครงสร้างของผลึกนั้นๆ $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ได้มีการนำมาใช้งานอย่างแพร่หลาย เช่น ตัวเร่งปฏิกิริยา, สารเคลือบป้องกันการกัดกร่อน, ฉนวนไฟฟ้า, ตัวดูดซับเนื่องจากมีพื้นที่ผิวสูง, มีความเสถียรทางเคมีและความร้อน, ความต้านทานการกัดกร่อนสูง, มีคุณสมบัติทางแสงที่ดี และเนื่องจากอะลูมินาแสดงให้เห็นการมีแนวโน้มที่ดีในการนำมาใช้งานระบบจัดเก็บความร้อนและใช้เป็นสารเคลือบที่ใช้ในระบบรวบรวมแสงอาทิตย์เนื่องจากมีความจำเพาะในการเลือกสเปกตรัมแสงอาทิตย์และเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนได้ดี จากข้อมูลที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่ามีการใช้อนุภาคนาโนโลหะคอมโพสิตในเมทริกซ์อะลูมินาในระบบรวบรวมแสงอาทิตย์เป็นอย่างมาก [65] คุณสมบัติของอะลูมินาสามารถปรับได้ตามวิธีการที่แตกต่างกัน โดยวิธีการทั่วไปที่ใช้ในการสังเคราะห์อะลูมินานั้นมีพื้นฐานมาจากโซล-เจล และการตกตะกอนทางเคมี แต่วิธีโซ-เจล เป็นเทคนิคที่ง่ายสุดต้นทุนต่ำสุดและสามารถทำได้ปริมาณมาก [66]

2.7.2 การสังเคราะห์อะลูมินาด้วยวิธีโซล-เจล



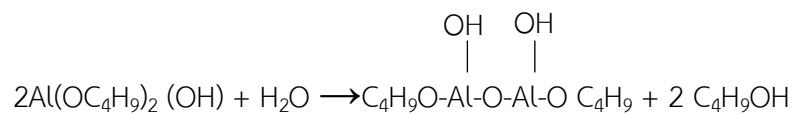
รูปที่ 24 แสดงวิธีการสังเคราะห์ด้วยวิธีโซล-เจล [66]

วิธีการสังเคราะห์ด้วยวิธีแบบโซล-เจล ถือว่าเป็นอีกวิธีหนึ่งที่เหมาะสมต่อการสังเคราะห์ผลึกนาโนขนาดเล็กจำนวนมาก เนื่องจากสามารถสังเคราะห์ได้ที่อุณหภูมิต่ำ ไม่ต้องใช้ระบบสุญญากาศ สามารถปรับปรุงโครงสร้างได้หลากหลาย และสามารถควบคุมอนุภาคให้มีขนาดระดับนาโนได้ กระบวนการสังเคราะห์แบบโซล-เจล คือการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวที่เรียกว่า “Sol” ให้อยู่ในรูปของสารแขวนลอย และเกาะตัวกันเป็นร่างแหอย่างไม่เป็นระเบียบเรียกว่า “Gel” จากนั้นนำสารที่ได้ไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิในช่วงไม่เกิน 1000 °C แสดงดังรูปที่ 24 โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในตอนเริ่มต้น คือ ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis reaction) แต่ถ้าเป็นกรณีที่ใช้สารละลายเป็นแอลกอฮอล์จะเกิดเป็นปฏิกิริยาแอลกอฮอล์ไลซิส (Alcoholysis reaction) จะได้มาซึ่งอนุภาคแขวนลอย “โซล” โดยโซลจะมีความหนาแน่นของอนุภาคของแข็งที่มากกว่าของเหลวที่อยู่รอบๆตัวมันและเนื่องจากความเป็นอนุภาคที่มีขนาดเล็กระดับ 0.1-1 ไมโครเมตร ทำให้โซลไม่เกิดการตกตะกอนแต่จะกระจายตัวอยู่ในสารละลายจากนั้นจะเกิดปฏิกิริยาการควบแน่น (Polymerization) ทำให้อนุภาคเกิดการเรียงต่อกันเป็นตาข่าย (network) ที่เรียกว่า “เจล” ซึ่งเป็นสารแขวนลอยชนิดหนึ่งที่จับตัวแข็งเสมือนวุ้นและมีความยืดหยุ่นสูง โดยจะได้ผลิตภัณฑ์ในรูปแบบต่างๆ เช่น เส้นใย (Fiber) แอโรเจล (Aerogel) ซีโรเจล (Xerogel) ผง (Powder) ตัวอย่างการเกิดโซ-เจลของ aluminium-n-butoxide สามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้ [14]

Hydrolysis



Polymerization



บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

ในส่วนของบทนี้เป็นการบรรยายถึงสารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองวิธีการดำเนินการสังเคราะห์นิกเกิลนาโนเซนด้วยใช้ปฏิกิริยารีดักชัน, ขั้นตอนการสังเคราะห์สารละลายอะลูมิเนียมโดยวิธีโซล-เจล และขั้นตอนการสังเคราะห์ตัวดูดซับพลังงานแสงอาทิตย์ นิกเกิลนาโนเซน-อะลูมินา

3.1 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนนิกเกิลโดยใช้ปฏิกิริยารีดักชัน

ในขั้นตอนนี้เป็นการสังเคราะห์นิกเกิลโดยใช้ปฏิกิริยารีดักชัน โดยที่ความเข้มข้นของ NaOH แตกต่างกัน

3.1.1 รายการสารเคมีที่ใช้สำหรับสังเคราะห์อนุภาคนาโนนิกเกิล

1. นิกเกิลคลอไรด์ ($\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), 98%, Carlo Erba
2. ไฮดราซีน ($\text{N}_2\text{H}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$), 98%, Carlo Erba
3. เอทิลีนไกลคอล ($\text{CH}_2\text{OHCH}_2\text{OH}$), 99.5%, Carlo Erba
4. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH), Ajax Finechem
5. เอทานอล ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$), 99.9%, Pan Reac Appli Chem
6. แอซีโตน ($\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$), 99.9%, Qrec
7. กรดไนตริก (HNO_3), 68%, Qrec

3.1.2 วิธีการสังเคราะห์อนุภาคนาโนนิกเกิลโดยใช้ปฏิกิริยารีดักชัน

1. เตรียมสารตั้งต้นสำหรับสังเคราะห์นิกเกิลนาโนเซน โดยเตรียมนิกเกิลคลอไรด์ 0.045 โมลาร์ ในเอทิลีนไกลคอลปริมาตร 200 มิลลิลิตร
2. เติม 0.9 โมลาร์ ไฮดราซีนลงในสารตั้งต้นที่ทำการผสมกันเรียบร้อยแล้ว
3. เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.18, 0.27, 0.36, 0.45, 0.54, 0.9 โมลาร์ (ที่อัตราส่วน $[\text{NaOH}]/[\text{NiCl}_2]$ เท่ากับ 4, 6, 8, 10, 12, 20 ตามลำดับ)
4. นำสารที่ผสมเข้ากันเรียบร้อยแล้วปิดฝาขวดให้สนิท จากนั้นนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงพร้อมกับปั่นกวน จนครบตามกำหนดเวลาแล้วรอให้อุณหภูมิลดลงจนถึงอุณหภูมิห้อง
5. นำผงนิกเกิลนาโนเซนที่ได้ไปและล้างด้วยแอซีโตนและเอทานอลทั้งหมด 3 ครั้ง เพื่อกำจัดสารปนเปื้อนที่ไม่ต้องการออก
6. อบผงนิกเกิลนาโนเซนเพื่อไล่ความชื้นออกที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงจะได้ผงนิกเกิลนาโนเซนที่พร้อมนำไปใช้งาน

3.2 การสังเคราะห์สารละลายอะลูมินาโดยวิธีโซล-เจล

ในขั้นตอนนี้เป็น การสังเคราะห์สารละลายอะลูมินาด้วยวิธีโซล-เจล

3.2.1 รายการสารเคมีที่ใช้สำหรับสังเคราะห์สารละลายอะลูมินา

1. อะลูมิเนียมไอโซโพรออกไซด์ ($C_9H_{21}AlO_3$), $\geq 99.99\%$, Sigma Aldrich
2. เอทานอล (C_2H_5OH), 99.9%, Pan Reac Appli Chem
3. น้ำปราศจากไอออน
4. กรดไฮโดรคลอริก (HCl), 37%, Qreck

3.2.2 วิธีสังเคราะห์สารละลายอะลูมินาด้วยวิธีโซล-เจล

1. เตรียมสารละลายอะลูมินาความเข้มข้น 0.18 โมลาร์ ละลายในน้ำกลั่นและเอทานอลในอัตราส่วน 1:1
2. สารที่ผสมเข้ากันเรียบร้อยแล้วปิดฝาขวดให้สนิท จากนั้นนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ $80^\circ C$ เป็นเวลา 1 ชั่วโมงพร้อมกับปั่นกวน
3. จากนั้นเติมกรดไฮโดรคลอริกในปริมาณที่เหมาะสมลงในสารละลายเพื่อปรับค่าพีเอชเป็น 2.5
4. เปิดฝาขวดและเพิ่มอุณหภูมิไปที่ $90^\circ C$ ปั่นกวนต่อเป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส

3.3 การขึ้นฟิล์มตัวดูดซับพลังงานแสงอาทิตย์

3.3.1 วิธีการเตรียมสารละลายอนุภาคนาโนนิกเกิล-อะลูมินา

1. นำผงนิกเกิลที่เตรียมได้จากข้อ 3.1.2 ซึ่ง 0.01, 0.02, 0.05, 0.1, 0.2 กรัม
2. เติมสารละลายอะลูมินาที่ได้จากข้อ 3.2.2 ปริมาตร 2 มิลลิลิตร
3. ปิดฝาขวดให้สนิทจากนั้นเขย่าให้สารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน

3.3.2 วิธีการเตรียมซับสเตรท

1. นำแผ่นสแตนเลสขนาด 2.5×2.5 cm แฉ่งลงในส่วนผสมระหว่าง กรดไนตริก 10 มิลลิลิตร กับ น้ำ 60 มิลลิลิตร และนำไปอัลตราโซนิกเป็นเวลา 30 นาที
2. ล้างด้วยเอซิโตน แฉ่งในเอซิโตนและนำไปให้ความร้อนที่ $60^\circ C$ เป็นเวลา 30 นาที
3. เก็บไว้ในเอซิโตน

3.3.3 การเตรียมฟิล์มอนุภาคนาโนนิกเกิล-อะลูมินา

1. นำสารละลายที่เตรียมในข้อ 3.3.1 มา 20 ไมโครลิตร

2. หยอดลงระหว่างแผ่นสแตนเลสกับใบปาดของเครื่อง convective ที่ทำมุม 45° กับ ซับสเตอร์ท
3. ใช้ความเร็วของเครื่อง convective อยู่ที่ 10000 $\mu\text{m/s}$
4. นำฟิล์มที่ได้ไปวางบน hot plate ที่อุณหภูมิ 80 °C เพื่อระเหยเอาตัวทำละลายบางส่วน ออกเป็นเวลา 1 นาที
5. นำฟิล์มที่ได้ไปเผาที่อุณหภูมิ 400°C ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

3.4 เครื่องมือในการวิเคราะห์ผล

1. เครื่องมือวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของตัวอย่างโดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction หรือ XRD; Bruker, Germany)
2. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนกำลังขยายสูงแบบส่องกราด (Scanning electron microscope หรือ SEM; FE-SEM with EDS (Hitachi SU8230))
3. เครื่องมือวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุ (Energy dispersive x-ray spectroscopy หรือ EDS; FE-SEM with EDS (Hitachi SU8230))
4. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนกำลังขยายสูงแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscopy หรือ TEM; JEOL-2100Plus)
5. วัดค่าการคายความร้อน (Emissometer)
6. เครื่องมือวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV-Vis NIR spectroscopy; Shimadzu, UV 2600)
7. Thermocouple, Thermometers: วัดอุณหภูมิของฟิล์มอนุภาคนาโนนิกเกิล-อะลูมินา และคำนวณหาค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity, k)

บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของสัดส่วนเชิงโมลของ NaOH ต่อ NiCl_2 ที่อัตราส่วน 4, 6, 8, 10, 12 และ 20 ในขั้นตอนการเตรียมอนุภาคนาโนนิกเกิล ซึ่งส่งผลต่อขนาดและรูปร่างของอนุภาคนาโนนิกเกิลโดยขนาด รูปร่าง และปริมาณของอนุภาคนาโนนิกเกิลในอะลูมินาเมทริกซ์ที่ต่างกันจะส่งผลให้สมบัติทางแสงของตัวดูดซับพลังงานแสงอาทิตย์นิกเกิลนาโนเซน-อะลูมินาต่างกันผลการทดลองถูกนำเสนอและอภิปราย ตามลำดับต่อไปนี้

4.1 ผลของสัดส่วนเชิงโมลของ NaOH ต่อ NiCl_2 ที่อัตราส่วน 4, 6, 8, 10, 12, 20 ที่ส่งผลต่อขนาดและรูปร่างของอนุภาคนาโนนิกเกิล

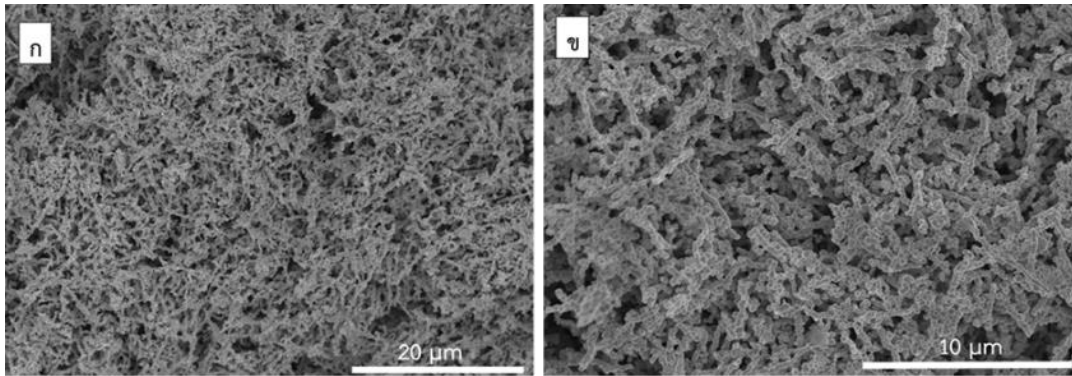
4.2 ผลของโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของอนุภาคนาโนนิกเกิลที่เหมาะสมสำหรับตัวดูดซับพลังงานแสงอาทิตย์

4.1 ผลของสัดส่วนเชิงโมลของ $[\text{NaOH}]/[\text{NiCl}_2]$ ที่อัตราส่วนต่างๆ

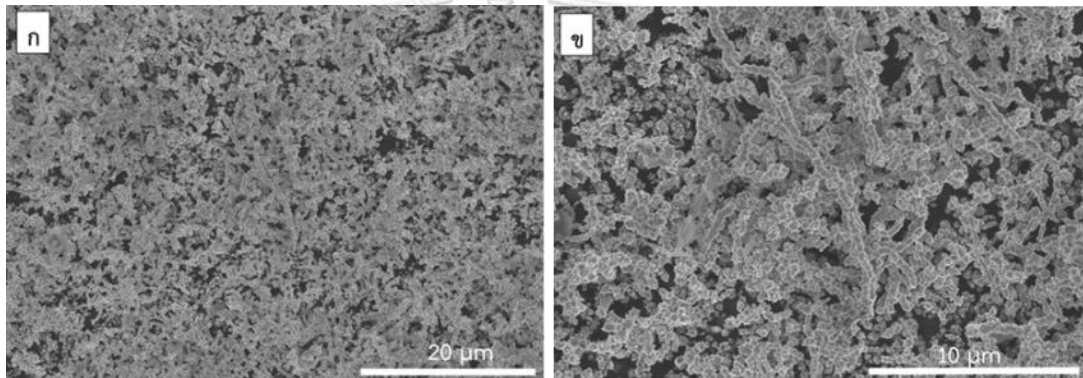
อนุภาคนาโนนิกเกิลที่สังเคราะห์ได้จากอัตราส่วนของ NaOH ต่อ NiCl_2 ที่แตกต่างกัน ถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscope (SEM), Transmission Electron Microscope (TEM), X-Ray Diffractometer (XRD), และ Energy-dispersive X-ray spectroscopy (ED-XRF) เพื่อดูผลของขนาดและรูปร่างของอนุภาคนาโนนิกเกิลที่อัตราส่วน 4, 6, 8, 10, 12, 20

4.1.1 ผลการวิเคราะห์ขนาดและรูปร่างของอนุภาคนาโนนิกเกิล

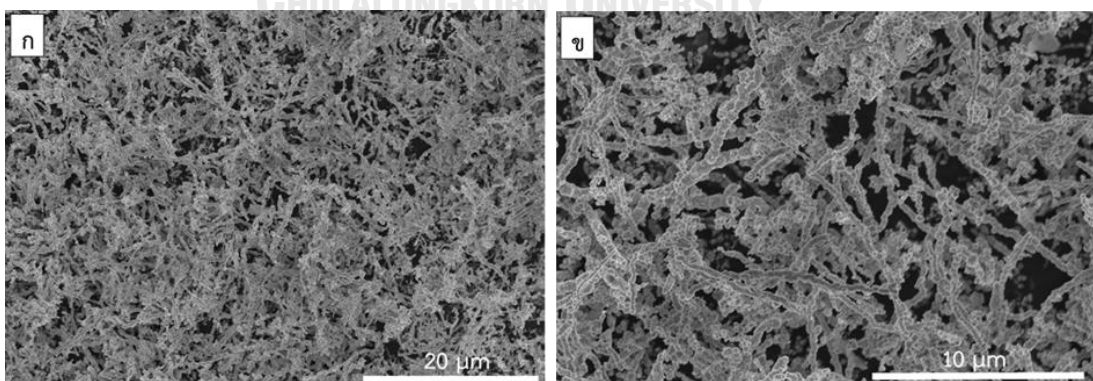
อนุภาคนาโนนิกเกิลถูกสังเคราะห์โดยปฏิกิริยารีดักชันจากอัตราส่วนของ $[\text{NaOH}]/[\text{NiCl}_2]$ ที่แตกต่างกันส่งผลให้อนุภาคนาโนนิกเกิลมีขนาดและรูปร่างที่ต่างกันแสดงดังรูปที่ 25-30



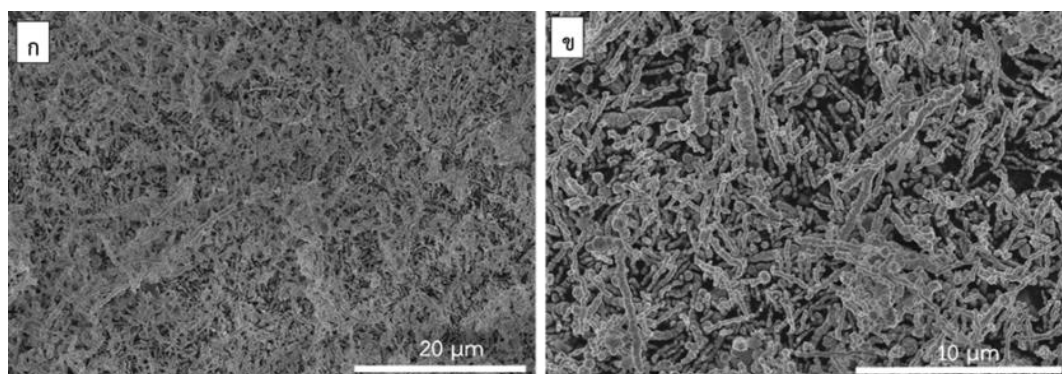
รูปที่ 25 ภาพ SEM อนุภาคนาโนนิกเกิลสังเคราะห์โดยปฏิกิริยารีดักชัน มีอัตราส่วนของ $[\text{NaOH}]/[\text{NiCl}_2]$ เท่ากับ 4 ที่เวลา 60 นาที ที่กำลังขยาย (ก) 2,000 และ (ข) 5,000



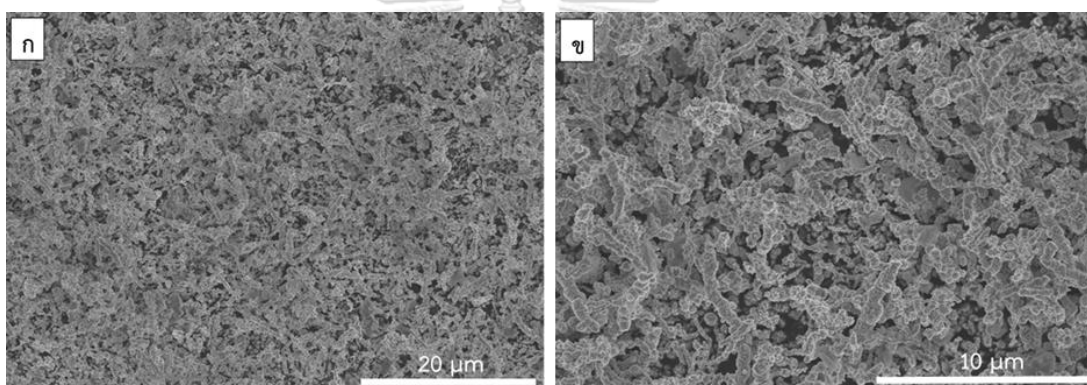
รูปที่ 26 ภาพ SEM อนุภาคนาโนนิกเกิลสังเคราะห์โดยปฏิกิริยารีดักชัน มีอัตราส่วนของ $[\text{NaOH}]/[\text{NiCl}_2]$ เท่ากับ 6 ที่เวลา 60 นาที ที่กำลังขยาย (ก) 2,000 และ (ข) 5,000



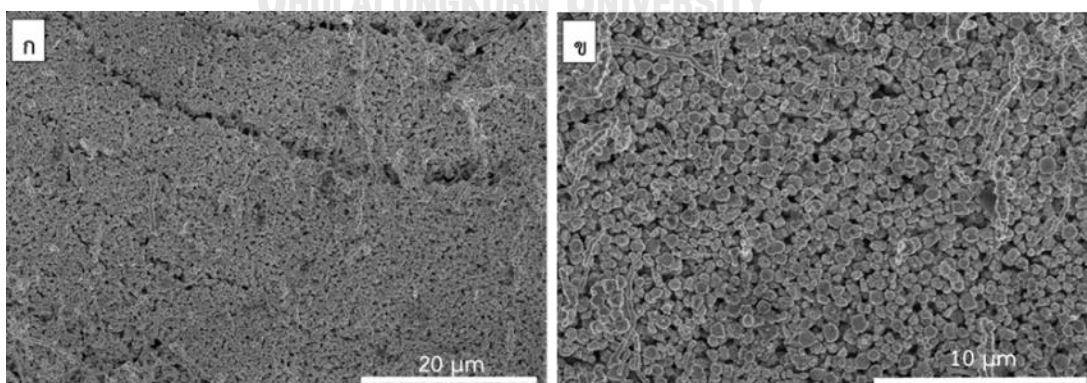
รูปที่ 27 ภาพ SEM อนุภาคนาโนนิกเกิลสังเคราะห์โดยปฏิกิริยารีดักชัน มีอัตราส่วนของ $[\text{NaOH}]/[\text{NiCl}_2]$ เท่ากับ 8 ที่เวลา 60 นาที ที่กำลังขยาย (ก) 2,000 และ (ข) 5,000



รูปที่ 28 ภาพ SEM ของอนุภาคนาโนนิกเกิลไฮดรอกไซด์ที่เกิดจากปฏิกิริยารีดักชัน มีอัตราส่วนของ $[\text{NaOH}]/[\text{NiCl}_2]$ เท่ากับ 10 ที่เวลา 60 นาทีที่กำลังขยาย (ก) 2,000 และ (ข) 5,000



รูปที่ 29 ภาพ SEM อนุภาคนาโนนิกเกิลไฮดรอกไซด์ที่เกิดจากปฏิกิริยารีดักชัน มีอัตราส่วนของ $[\text{NaOH}]/[\text{NiCl}_2]$ เท่ากับ 12 ที่เวลา 60 นาทีที่กำลังขยาย (ก) 2,000 และ (ข) 5,000

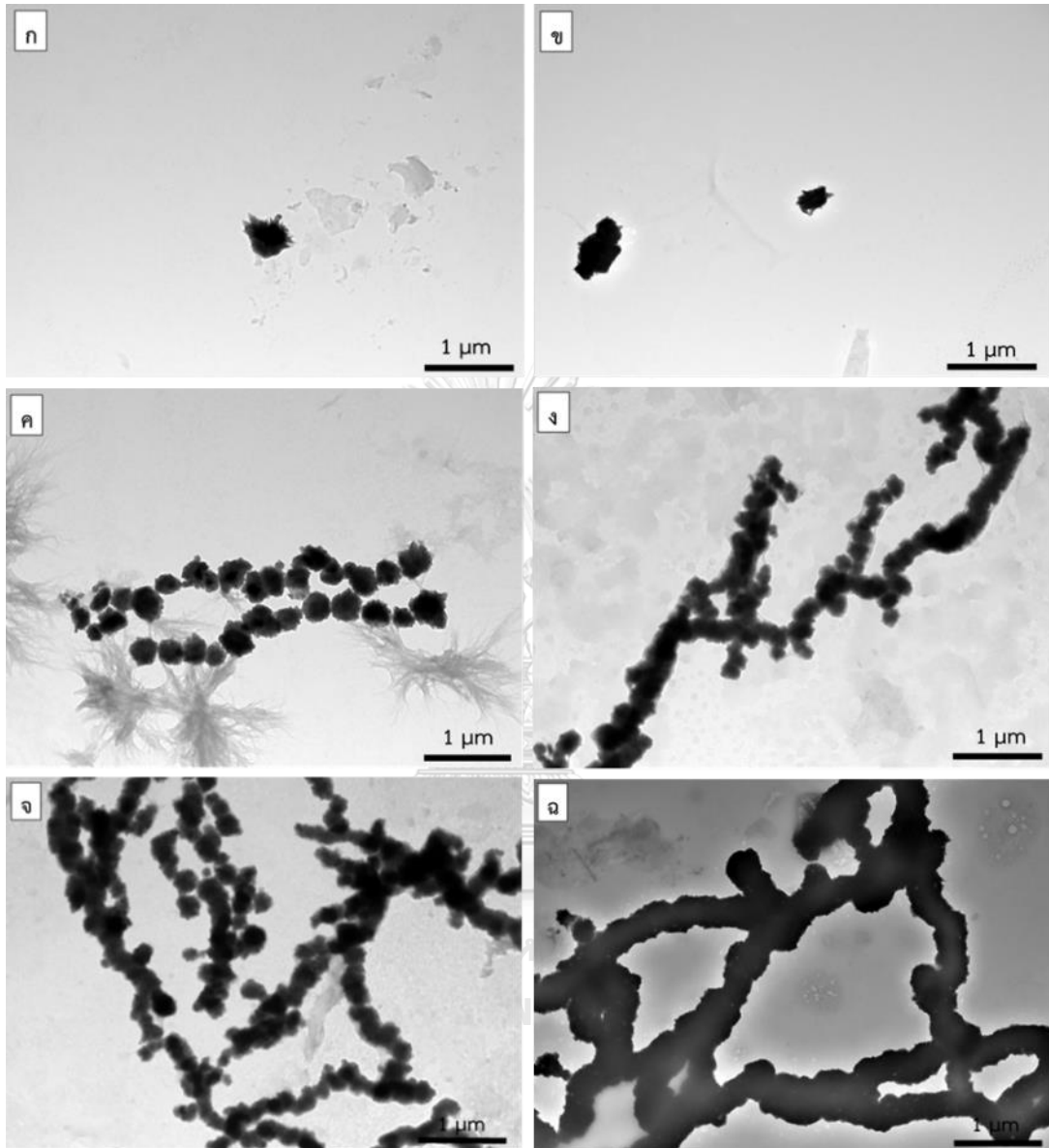


รูปที่ 30 ภาพ SEM อนุภาคนาโนนิกเกิลไฮดรอกไซด์ที่เกิดจากปฏิกิริยารีดักชัน มีอัตราส่วนของ $[\text{NaOH}]/[\text{NiCl}_2]$ เท่ากับ 20 ที่เวลา 60 นาทีที่กำลังขยาย (ก) 2,000 และ (ข) 5,000

ขนาดและรูปร่างของอนุภาคนาโนนิกเกิลขึ้นอยู่กับสัดส่วนเชิงโมลของ $[\text{NaOH}]/[\text{NiCl}_2]$ เมื่ออัตราส่วนเท่ากับ 4 อนุภาคนาโนนิกเกิลที่สังเคราะห์ที่ได้ส่วนใหญ่จะมีลักษณะคล้ายสายโซ่ดังรูป 25 (ก) เกิดจากอนุภาคนาโนนิกเกิลที่มีรูปร่างคล้ายทรงกลมเชื่อมต่อกันด้วยกันจนมีลักษณะคล้ายสายโซ่สั้นๆ ดังรูป 25 (ข) วัดเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวเฉลี่ยของอนุภาคนาโนนิกเกิลจากภาพ SEM แสดงดังภาคผนวก ก พบว่ามีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวเฉลี่ยประมาณ 271 ± 70 นาโนเมตรและ 1.51 ± 0.56 ไมโครเมตรตามลำดับ เมื่ออัตราส่วนของ $[\text{NaOH}]/[\text{NiCl}_2]$ เพิ่มขึ้นเท่ากับ 6 จนกระทั่งถึง 8 สายโซ่ของอนุภาคนาโนนิกเกิลมีความยาวเพิ่มขึ้นแสดงดังรูป 26–27 และเมื่ออัตราส่วนเท่ากับ 8 อนุภาคนาโนนิกเกิลจะมีความยาวมากกว่าอัตราส่วนอื่นและมีการเชื่อมต่อกันจนมีลักษณะคล้ายสายโซ่ยาว ที่อัตราส่วนเท่ากับ 8 พบว่าขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวเฉลี่ยประมาณ 284 ± 72 นาโนเมตร และ 2.27 ± 0.79 ไมโครเมตรตามลำดับดังรูป 27 แต่เมื่ออัตราส่วน $[\text{NaOH}]/[\text{NiCl}_2]$ เพิ่มขึ้นเท่ากับ 10 จนถึงกระทั่ง 12 พบว่าทั้งขนาดและความยาวของอนุภาคนาโนนิกเกิลมีการกระจายตัวมากขึ้นมีลักษณะเป็นสายโซ่สั้นและยาว บางอนุภาคมีลักษณะคล้ายทรงกลมดังรูป 28–29 เมื่อเพิ่มอัตราส่วน $[\text{NaOH}]/[\text{NiCl}_2]$ เพิ่มขึ้นถึง 20 เท่า พบอนุภาคส่วนใหญ่มีลักษณะคล้ายทรงกลมและมีอนุภาคที่มีลักษณะคล้ายสายโซ่ขนาดเล็กน้อยดังรูป 30 (ก) อนุภาคนาโนนิกเกิลที่มีขนาดใหญ่ขึ้นดังรูป 30 (ข) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้นเป็น 527 ± 130 นาโนเมตร

4.1.2 ผลการวิเคราะห์กลไกการเกิดอนุภาคคล้ายสายโซ่ของอนุภาคนาโนนิกเกิล

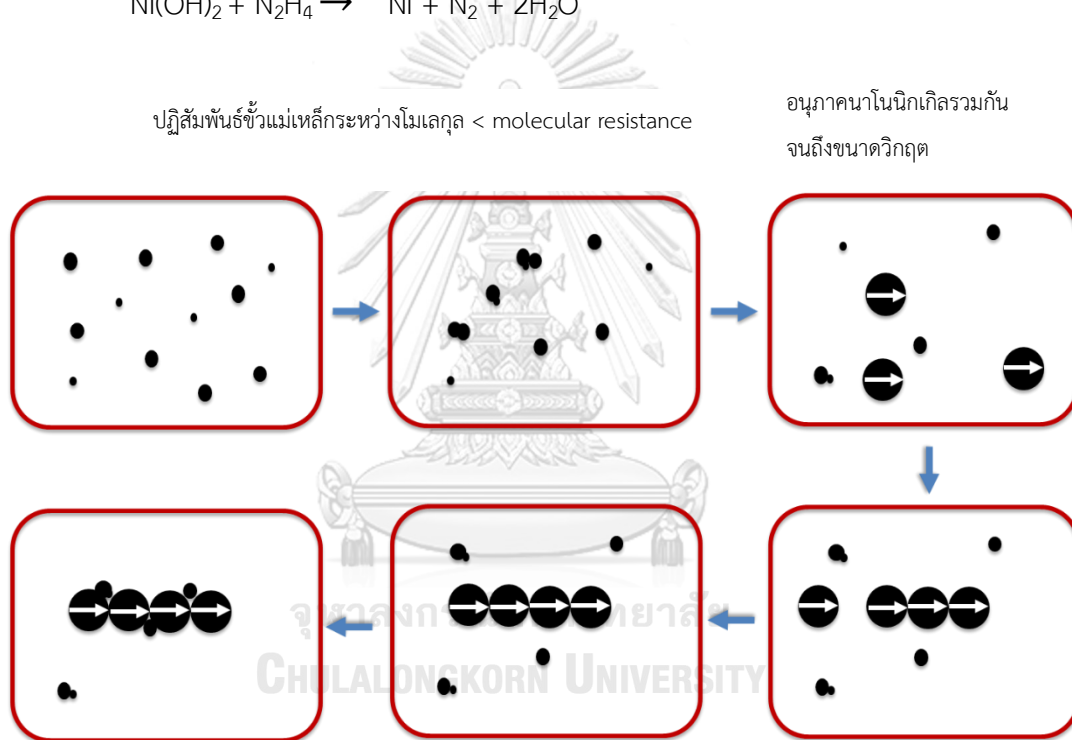
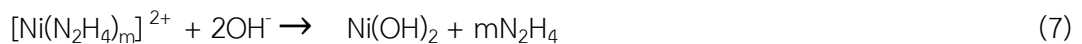
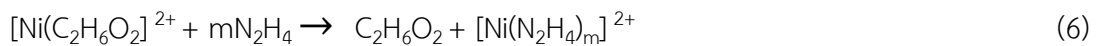
เครื่อง TEM เป็นเครื่องมือที่ใช้ศึกษากลไกการเกิดสายโซ่ของอนุภาคนาโนนิกเกิลที่เตรียมอัตราส่วน $[\text{NaOH}]/[\text{NiCl}_2]$ เท่ากับ 8 ที่เวลาต่างๆ แสดงดังรูปที่ 31



รูปที่ 31 ภาพ TEM ของอนุภาคนาโนนิกเกิลที่อัตราส่วนของ $[\text{NaOH}]/[\text{NiCl}_2]$ เท่ากับ 8 ที่เวลา (ก)10 (ข)20 (ค)30 (ง)40 (จ)50 และ (ฉ)60 นาทีตามลำดับ ที่กำลังขยาย 10,000

สายโซ่ของอนุภาคนาโนนิกเกิลเกิดจากปฏิกิริยารีดักชันโดยมี Nickel chloride (NiCl_2) ละลายอยู่ในตัวทำละลาย ethylene glycol (EG) เกิดเป็น $[\text{Ni}(\text{C}_2\text{H}_6\text{O}_2)]^{2+}$ ตามสมการที่ 5 ได้สารละลายสีเขียว $[\text{Ni}(\text{C}_2\text{H}_6\text{O}_2)]^{2+}$ ง่ายต่อการถูกแทนที่ด้วย Hydrazine (N_2H_4) สีของสารละลายเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงินซึ่งเกิดจากสารประกอบเชิงซ้อนของนิกเกิลตามสมการที่ 6 ในปฏิกิริยาจะมี NaOH ทำหน้าที่เป็น

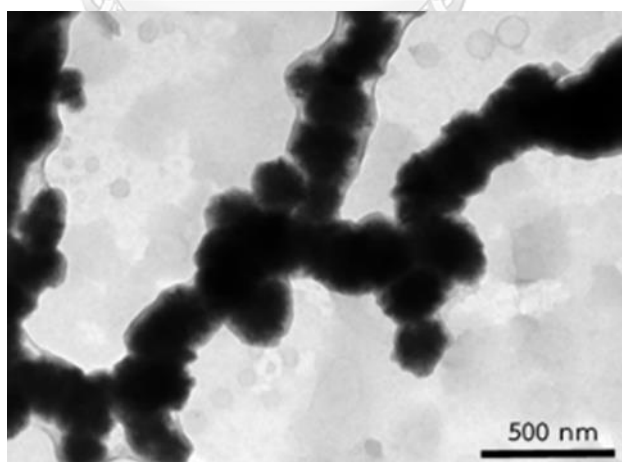
ตัวปรับพีเอชของสารละลาย [67] และทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดย $[\text{Ni}(\text{N}_2\text{H}_4)_m]^{2+}$ จะทำปฏิกิริยากับ OH^- เกิดเป็นตะกอนของ $\text{Ni}(\text{OH})_2$ ตามสมการที่ 7 ซึ่งถ้าปริมาณของ NaOH มากก็จะได้ $\text{Ni}(\text{OH})_2$ มากขึ้น เมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60°C พร้อมกับปั่นกวนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง N_2H_4 ทำหน้าที่เป็นตัว reducing agent เปลี่ยน $\text{Ni}(\text{OH})_2$ เป็นอนุภาคนาโนนิกเกิลตามสมการที่ (8)



รูปที่ 32 แผนภาพแสดงขั้นตอนการก่อตัวเป็นสายโซ่ของอนุภาคนาโนนิกเกิล [62]

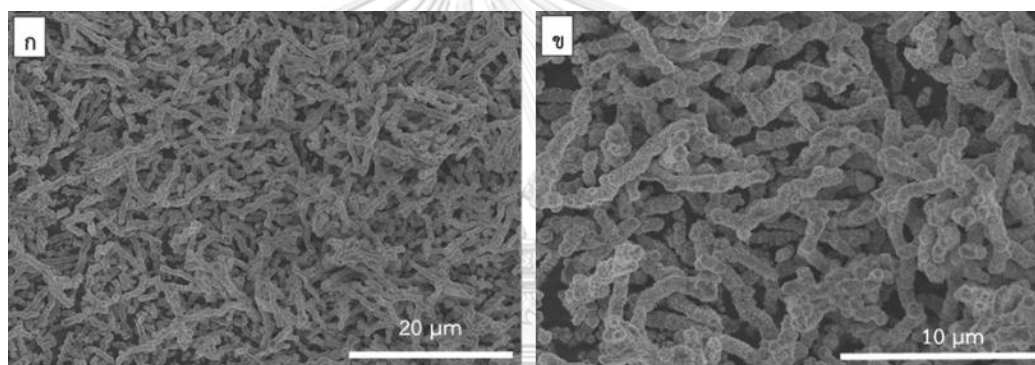
ขั้นตอนการเกิดสายโซ่อนุภาคนาโนนิกเกิลแบ่งเป็น 3 ขั้นตอนหลักๆ คือ ขั้นแรกเมื่อเกิดปฏิกิริยารีดักชันจะเกิดเป็นนิกเกิลนิวคลีโอ (nuclei) ซึ่งมีลักษณะคล้ายทรงกลมเกิดขึ้น ในขั้นที่สองอนุภาคนาโนนิกเกิลขนาดเล็กเกิดการเคลื่อนที่แบบ Brownian motion และดึงดูดเข้าหากันด้วย electrostatic repulsive force เนื่องจากปฏิสัมพันธ์ขั้วแม่เหล็กระหว่างโมเลกุล (magnetic dipole-dipole interaction) น้อยกว่า molecular resistance จึงส่งผลให้เกิดการรวมตัวของอนุภาคนาโนขนาดเล็กกลายเป็นอนุภาคนาโนขนาดใหญ่ขึ้นแสดงดังภาพ TEM หน้าที่ 10 ดังรูป 31

(ก) เมื่ออนุภาคนาโนนิกเกิลรวมกันจนถึงขนาดวิกฤตส่งผลให้ความเป็นขั้วของอนุภาคนาโนนิกเกิลเพิ่มขึ้นทำให้ความเป็นแม่เหล็กยิ่งมากขึ้นและทำให้ molecular resistance น้อยกว่าปฏิสัมพันธ์ขั้วแม่เหล็กระหว่างโมเลกุล [68] ดังนั้นในขั้นตอนนี้ส่งผลให้อนุภาคนาโนนิกเกิลเกิดการจัดเรียงตัวเป็นแนวระนาบในทิศทางเดียว เนื่องจากนิกเกิลเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็น ferromagnetic อนุภาคนาโนนิกเกิลจึงสามารถจัดเรียงตัวเป็นลักษณะสายโซ่ได้ด้วยตัวเองโดยไม่จำเป็นต้องมีสนามไฟฟ้า [62] อนุภาคนาโนนิกเกิลแต่ละอนุภาคเริ่มต่อกันเป็นสายโซ่ที่นาที่ 30 สังเกตเห็นได้ว่าอนุภาคนาโนจะจัดเรียงตัวเป็นสายโซ่ที่ยาวเพิ่มขึ้นและเห็นการเรียงตัวของอนุภาคนาโนแต่ละอนุภาคอย่างชัดเจน ดังภาพ 31 (ค) และนาที่ที่ 40 และ 50 จะเห็นสายโซ่ของอนุภาคนาโนนิกเกิลยาวขึ้นเรื่อยๆ และเริ่มมีอนุภาคนาโนขนาดเล็กที่เกิดขึ้นใหม่ไปเกาะอยู่ที่ช่องว่างระหว่างอนุภาคนาโนเพื่อลดพลังงานพื้นผิวของตัวมันเอง [68] ดังแสดงในรูป 31 (ง) และ (จ) ในนาที่ที่ 60 สายโซ่ของอนุภาคนาโนมีลักษณะเป็นเหมือนท่อและบริเวณพื้นผิวของสายโซ่มีลักษณะเป็นหนามแหลม [67] ซึ่งเกิดจากอนุภาคนาโนขนาดเล็กที่เกิดขึ้นใหม่ไปเติมเต็มช่องว่างระหว่างอนุภาคนาโนดังภาพ 31 (ฉ) ขั้นตอนการก่อตัวเป็นสายโซ่ของอนุภาคนาโนนิกเกิลนั้นสรุปได้ดังแผนภาพที่ 32 สายโซ่ของอนุภาคนาโนนิกเกิลสามารถคงรูปและยึดหยุ่นได้นั้นอาจเนื่องจากมี EG ที่มีลักษณะเหมือนร่างแหเคลือบอยู่บริเวณพื้นผิวของสายโซ่ของอนุภาคนาโนนิกเกิลจึงช่วยให้สายโซ่คงรูปอยู่ได้แม้ไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอกสายโซ่ก็จะไม่สลายตัวหรือเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง [62] แสดงดังรูป TEM 33



รูปที่ 33 ภาพ TEM อนุภาคนาโนนิกเกิลที่อัตราส่วนของ $[\text{NaOH}]/[\text{NiCl}_2]$ เท่ากับ 8 ที่เวลา 40 นาที
กำลังขยาย 25,000

ในงานวิจัยก่อนหน้านี้ Zhiyu Wang และคณะผู้วิจัยได้สังเคราะห์ TiO_2 nanochain โดยใช้วิธี two-step solvothermal จากการศึกษาพบว่าแท้จริงแล้วหมู่ไฮดรอกซิลมีผลต่อขนาดและรูปร่างของอนุภาคนาโน TiO_2 ในงานวิจัยนี้ยังมีการยืนยันผลของหมู่ไฮดรอกซิล (OH) โดยทีมผู้วิจัยได้เตรียมอนุภาคนาโน TiO_2 ด้วยเบสชนิดอื่น เช่น $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$ และ $\text{C}_3\text{H}_7\text{OH}$ จากผลการทดลอง พบว่าสายโซ่ของอนุภาคนาโน TiO_2 ยังคงเกิดขึ้นอยู่ สิ่งนี้แสดงให้เห็นว่าหมู่ไฮดรอกซิลเป็นปัจจัยสำคัญในการควบคุมขนาดและรูปร่างของอนุภาคนาโนแบบโซ่ [69] ในงานวิจัยเพื่อสังเคราะห์อนุภาคนาโนนิกเกิลแบบสายโซ่นี้ จึงทดลองโดยการเปลี่ยนเบสเป็นชนิดอื่น จากการใช้ NaOH เป็น NH_4OH แต่ยังคงใช้อัตราส่วน $[\text{NH}_4\text{OH}]/[\text{NiCl}_2]$ เท่ากับ 8 จากผลการทดลองสังเกตได้ว่าอนุภาคนาโนนิกเกิลที่ได้ยังคงมีลักษณะเป็นสายโซ่ แสดงดังรูป 34 ซึ่งเหมือนกับการใช้เบส NaOH ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าหมู่ OH มีความสำคัญต่อการเกิดเป็นสายโซ่ของอนุภาคนาโน

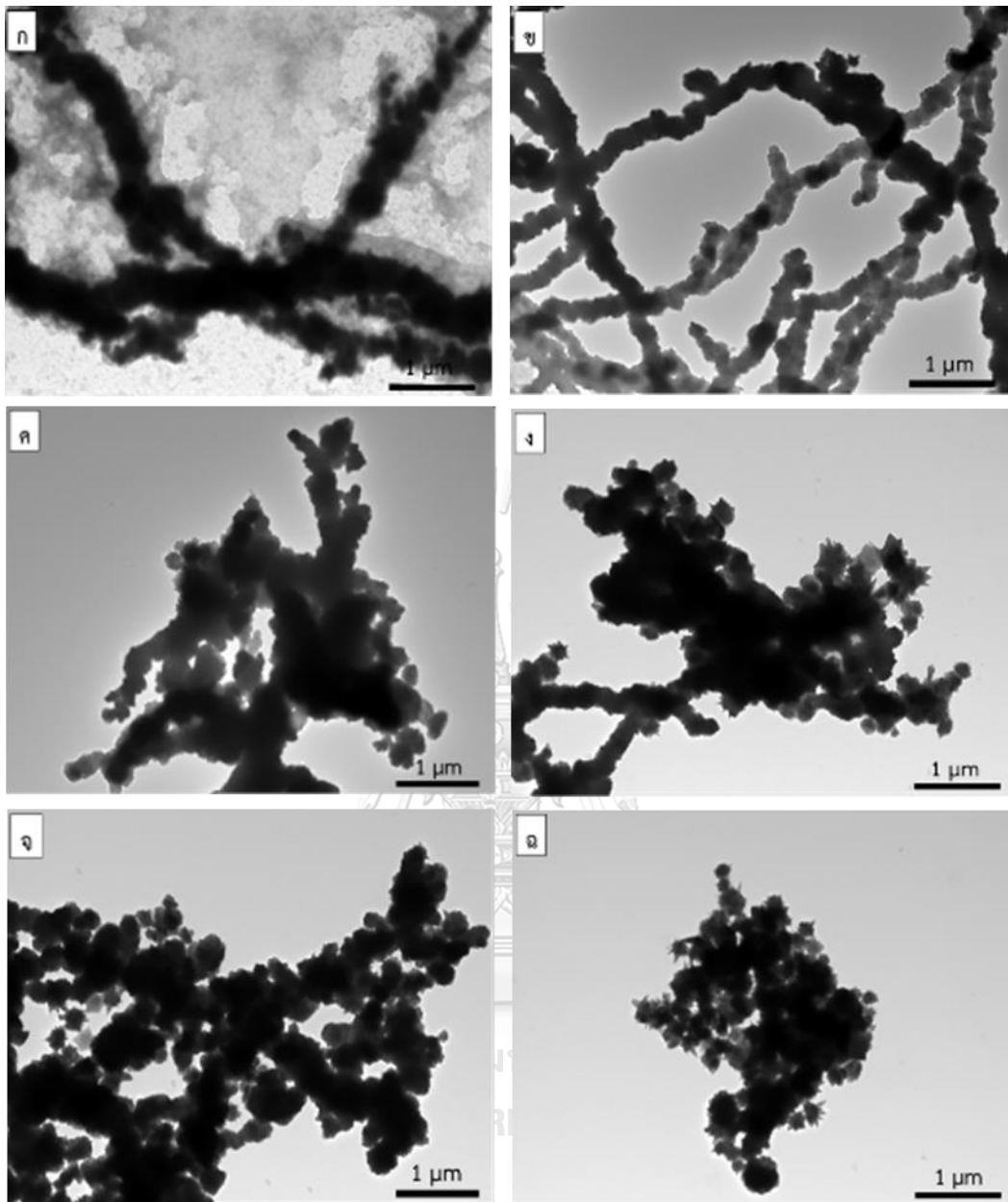


รูปที่ 34 ภาพ SEM อนุภาคนาโนนิกเกิลสังเคราะห์โดยปฏิกิริยารีดักชัน มีอัตราส่วนของ NH_4OH ต่อ NiCl_2 เท่ากับ 8 ที่เวลา 60 นาที กำลังขยาย (ก) 2,000 และ (ข) 5,000

CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.1.3 ผลการวิเคราะห์กลไกการเกิดอนุภาคคล้ายทรงกลมของอนุภาคนาโนนิกเกิล

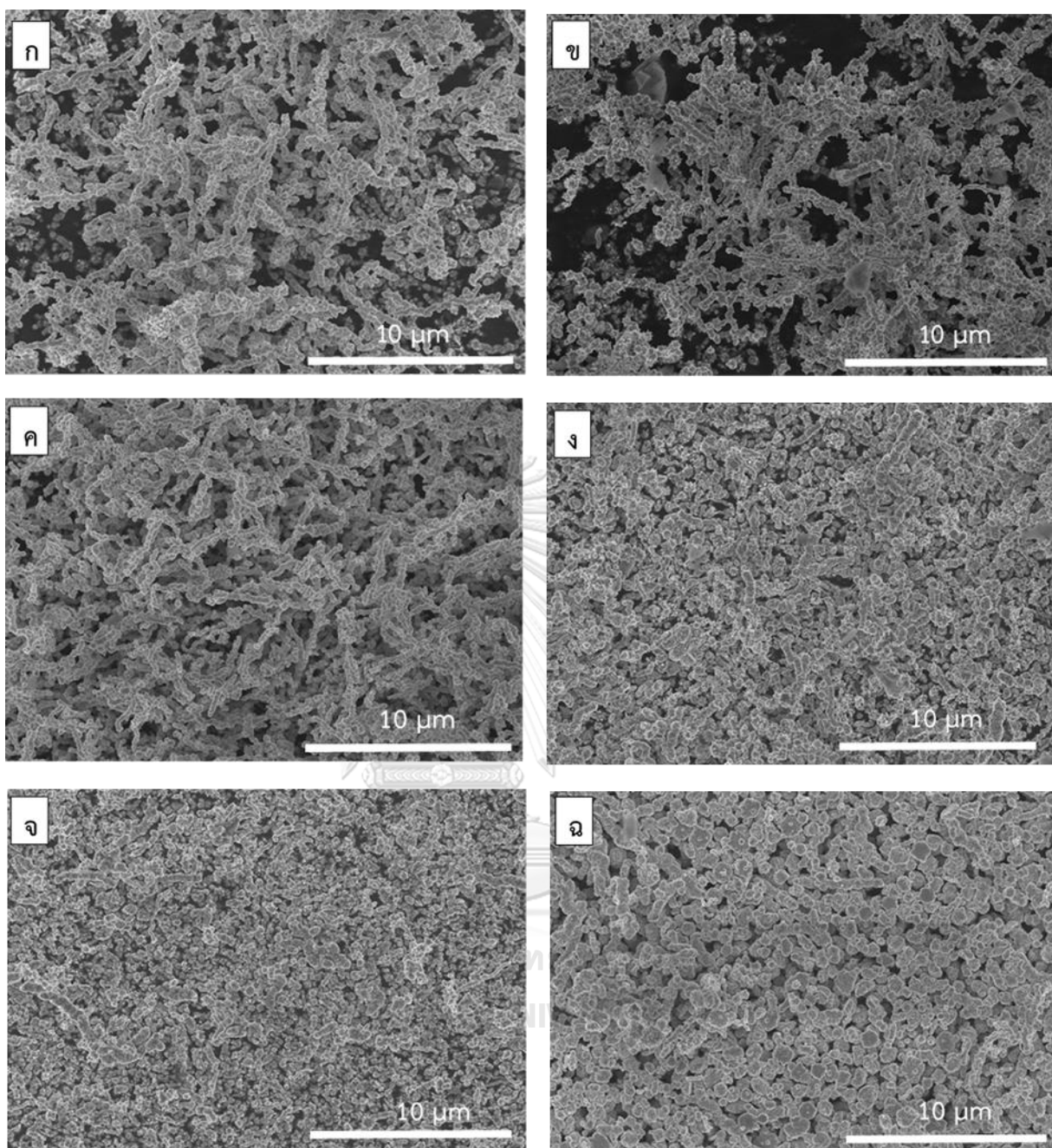
จากภาพที่ 35 แสดงอนุภาคนาโนนิกเกิลที่สังเคราะห์จากอัตราส่วนของ NaOH ต่อ NiCl_2 เท่ากับ 20 ที่เวลา 60 นาที สังเกตได้ว่าที่อัตราส่วนที่มากขึ้นอนุภาคนาโนนิกเกิลเปลี่ยนจากรูปร่างคล้ายสายโซ่กลับมาเป็นอนุภาคคล้ายทรงกลม ซึ่งแตกต่างจากอนุภาคที่เตรียมจากอัตราส่วนที่ 8 ดังนั้นการวิเคราะห์ด้วย TEM จะเป็นการศึกษากลไกการเกิดเป็นอนุภาคคล้ายทรงกลมแทนที่จะเป็นสายโซ่ แสดงดังรูปที่ 35 โดยศึกษาที่อัตราส่วน $[\text{NaOH}]/[\text{NiCl}_2]$ เท่ากับ 20 ณ เวลาต่างๆ



รูปที่ 35 ภาพ TEM อนุภาคนาโนนิกเกิลที่อัตราส่วนของ $[\text{NaOH}]/[\text{NiCl}_2]$ เท่ากับ 20 ที่เวลา (ก) 10, (ข) 20, (ค) 30, (ง) 40, (จ) 50, (ฉ) 60 นาทีตามลำดับ ที่กำลังขยาย 10,000

จากภาพ TEM สังเกตเห็นว่าสายโซ่ของอนุภาคนาโนนิกเกิลปรากฏขึ้นตั้งแต่ 10 นาทีแรก ซึ่งแตกต่างจากอนุภาคที่เตรียมจากอัตราส่วน $[\text{NaOH}]/[\text{NiCl}_2]$ เท่ากับ 8 เนื่องจากเมื่อปริมาณของ NaOH ที่เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ $[\text{Ni}(\text{N}_2\text{H}_4)_m]^{2+}$ ทำปฏิกิริยากับ OH^- เกิดเป็นตะกอนของ $\text{Ni}(\text{OH})_2$ ได้มากขึ้น ทำให้ N_2H_4 reduce $\text{Ni}(\text{OH})_2$ ได้อนุภาคนาโนนิกเกิลมากขึ้นแสดงดังภาคผนวก ข เมื่อมีอนุภาคนาโนนิกเกิลเกิดขึ้นจำนวนมากทำให้อนุภาคนาโนนิกเกิลรวมตัวกัน และเปลี่ยนเป็นสายโซ่

อย่างรวดเร็วตั้งแต่ 10 นาทีแรก จากงานวิจัยก่อนหน้านี้ Zhang และคณะผู้วิจัยได้สังเคราะห์ Ni nanowires (NiNW_s) โดยใช้วิธี hydrazine reduction พบว่าค่าพีเอชของสารละลายมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของนิกเกิล เมื่อค่าพีเอชสูงขึ้นจะส่งผลให้ปฏิกิริยาเกิดเร็วขึ้นระยะเวลาที่ใช้เกิดปฏิกิริยาสมบูรณ์สั้นกว่า [70] ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลอง สังเกตเห็นได้ว่าที่อัตราส่วน [NaOH]/[NiCl₂] เท่ากับ 20 ซึ่งมีพีเอชสูงกว่าอัตราส่วนอื่นๆ อนุภาคนาโนนิกเกิลจึงเรียงตัวเป็นสายโซ่สมบูรณ์ตั้งแต่นาทีที่ 10 และต่อเป็นสายโซ่ที่ยาวขึ้นดังรูป 35 (ก) และ (ข) นอกจากนั้นการเพิ่มปริมาณของ NaOH ส่งผลให้โอกาสการรวมตัวกันของอนุภาคเพิ่มขึ้นทำให้ขนาดของอนุภาคใหญ่ขึ้น [71] เนื่องจากจำนวนของอนุภาคนาโนนิกเกิลที่เกิดขึ้นมีมากส่งผลให้สุดท้ายแล้วอนุภาคนาโนนิกเกิลที่เป็นสายโซ่เกิดการม้วนตัวและรวมกัน และอาจเนื่องมาจากผลของ NaOH มากกว่าผลของความเข้มข้นเหล็กจึงส่งผลให้อนุภาคนาโนนิกเกิลที่เรียงตัวเป็นสายโซ่ในช่วงแรกเริ่มเกิดการรวมตัวกันดังรูป 35 (ค), (ง) และ (จ) ที่นาที 60 อนุภาคนาโนนิกเกิลรวมตัวกันเป็นอนุภาคคล้ายทรงกลมที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ดังรูป 35 (ฉ) หลังจากนั้นผู้วิจัยได้ศึกษารูปร่างและความยาวของอนุภาคนาโนนิกเกิลพบว่าขนาดและรูปร่างของอนุภาคนาโนนิกเกิลที่แต่ละอัตราส่วนไม่เปลี่ยนแปลงมากนักแม้จะให้ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยานานขึ้นเป็น 2 ชั่วโมง ดังรูป 36 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ Weijia Wen และคณะผู้วิจัยได้ทำการสังเคราะห์ NiNW_s โดยใช้ปฏิกิริยารีดักชัน พบว่าระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยามีผลต่อขนาดและรูปร่างของอนุภาคนาโนนิกเกิล แต่อาจไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการก่อตัวของอนุภาคนาโนหลังจาก 1 นาที ขนาดและความยาวจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ 10 นาทีจะเริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงของรูปร่าง จากนั้นการเจริญเติบโตจะชะลอลงและไม่มีการเติบโตที่ชัดเจนหลังจาก นาทีที่ 30 เป็นต้นไป [64] จึงกล่าวได้ว่าผลของเวลาในการเกิดปฏิกิริยาไม่ค่อยมีผลมากนักเมื่อเทียบกับผลของ NaOH ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและเป็นตัวกำหนดรูปร่างของอนุภาคนาโนนิกเกิลอีกด้วย

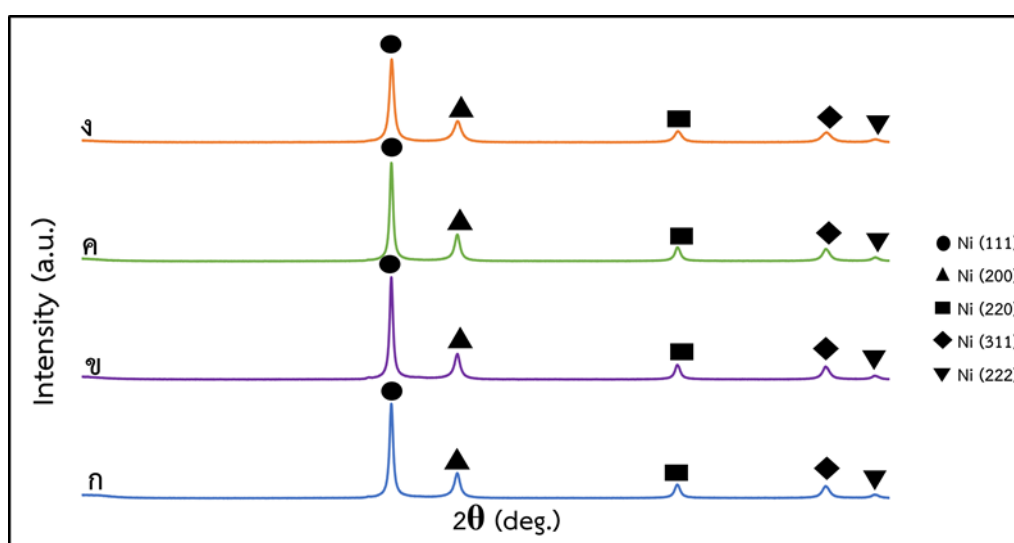


รูปที่ 36 ภาพ SEM อนุภาคนาโนนิกเกิลสังเคราะห์โดยปฏิกิริยารีดักชัน มีอัตราส่วนของ NaOH ต่อ NiCl_2 เท่ากับ (ก) 4, (ข) 6, (ค) 8, (ง) 10, (จ) 12, (ฉ) 20 ที่เวลา 120 นาที กำลังขยาย 5,000

4.1.4 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของอนุภาคนาโนนิกเกิล

รูปที่ 37 แสดงข้อมูลความเป็นผลึกของอนุภาคนาโนนิกเกิลที่สังเคราะห์ได้จากอัตราส่วนของ NaOH ต่อ NiCl_2 เท่ากับ (ก) 4, (ข) 8, (ค) 10, (ง) 20 ด้วยเครื่อง X-ray diffraction โดยวิเคราะห์ค่า 2θ ตั้งแต่ 10 ถึง 100 องศาจากการวิเคราะห์ พบว่ามีสัญญาณขึ้นสูงที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ

44.4, 51.8, 76.3, 92.9, 98.4 องศา ซึ่งสอดคล้องกับระนาบ (100), (200), (220), (311), (222) ตามลำดับ สามารถกล่าวได้ว่าอนุภาคนาโนนิกเกิลมีโครงสร้างเป็น face-centered cubic (fcc) ตามเอกสารอ้างอิง 03-065-2865 และยังบ่งบอกถึงความเป็นโลหะนิกเกิลบริสุทธิ์ [72] จากกราฟสังเกตได้ว่าโครงสร้างผลึกของอนุภาคนาโนนิกเกิลที่สังเคราะห์ได้จากอัตราส่วนของ NaOH ต่อ NiCl_2 ที่แตกต่างกัน พบสัญญาณขึ้นที่ตำแหน่งเดียวกัน จึงกล่าวได้ว่าอนุภาคนาโนนิกเกิลที่สังเคราะห์ได้นั้นเป็นชนิดเดียวกันเนื่องจากมีโครงสร้างผลึกแบบเดียวกัน

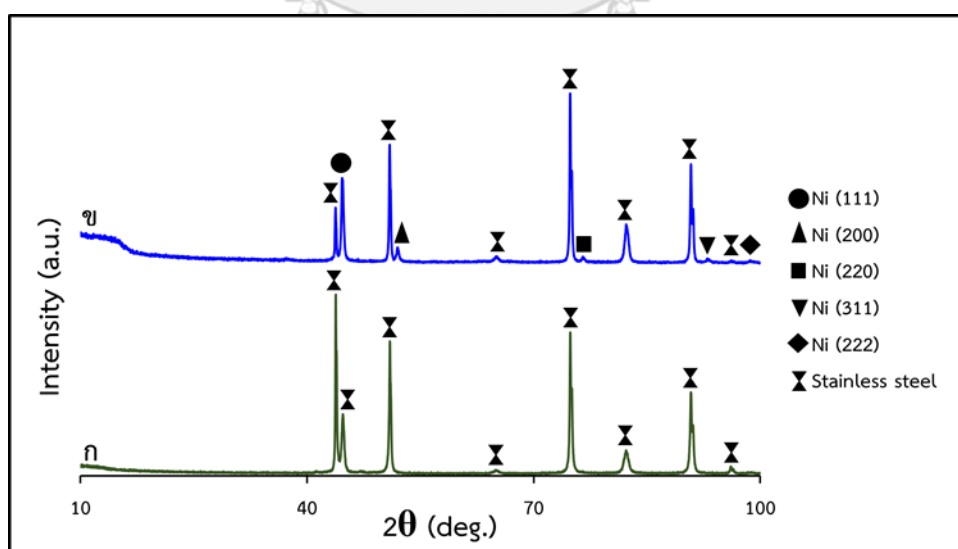


รูปที่ 37 โครงสร้างผลึกของอนุภาคนาโนนิกเกิลสังเคราะห์โดยปฏิกิริยารีดักชัน มีอัตราส่วนของ $[\text{NaOH}]/[\text{NiCl}_2]$ เท่ากับ (ก) 4, (ข) 8, (ค) 10, (ง) 20

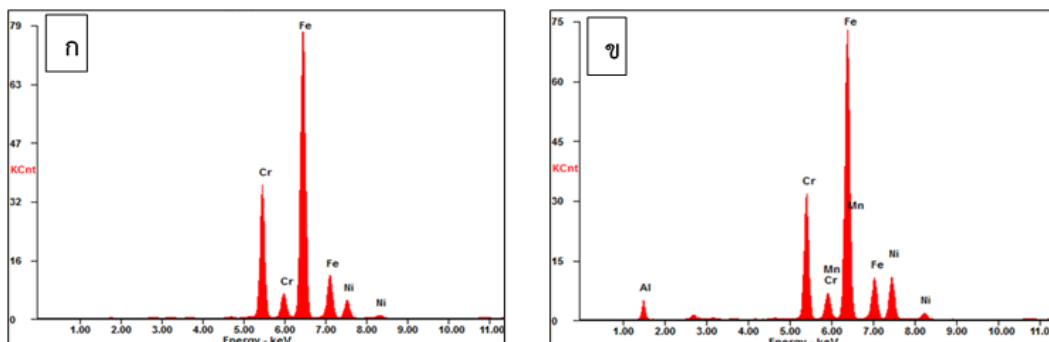
4.1.5 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของฟิล์มอนุภาคนาโนนิกเกิล-อะลูมินา

เมื่อพิจารณารูปที่ 38 เป็นการเปรียบเทียบโครงสร้างผลึกของ (ก) สแตนเลสสตีลซึ่งเป็นซับสเตรทกับ (ข) ฟิล์มอนุภาคนาโนนิกเกิล-อะลูมินาบนสแตนเลส พบว่ากราฟที่ไม่มีฟิล์มนิกเกิลจะพบเพียงตำแหน่งสัญญาณของสแตนเลสสตีลเท่านั้นดังภาพ 38 (ก) ตามเอกสารอ้างอิง 00-033-0397 ไม่ปรากฏฟีกของอนุภาคนาโนนิกเกิล เมื่อทำการเคลือบฟิล์มอนุภาคนาโนนิกเกิล-อะลูมินาลงบนสแตนเลสจะปรากฏสัญญาณของฟิล์มอนุภาคนาโนนิกเกิลดังภาพ 38 (ข) ที่ตำแหน่งเดียวกับอนุภาคนาโนนิกเกิลดังภาพ 37 และจากภาพ 38 (ข) จะเห็นได้ว่ามีฟีกของสแตนเลสที่ซ้อนทับกับฟีกนิกเกิลที่ตำแหน่ง 44.4° (111) แต่เมื่อทำการเปรียบเทียบพบว่าสัดส่วนความสูงของฟีกที่ตำแหน่ง 43.6° และ 44.4° มีการเปลี่ยนไปเมื่อมีฟิล์มนิกเกิล ฟีกที่ตำแหน่ง 44.4° สูงขึ้น ซึ่งเป็นการยืนยันได้ว่าเกิดฟิล์ม

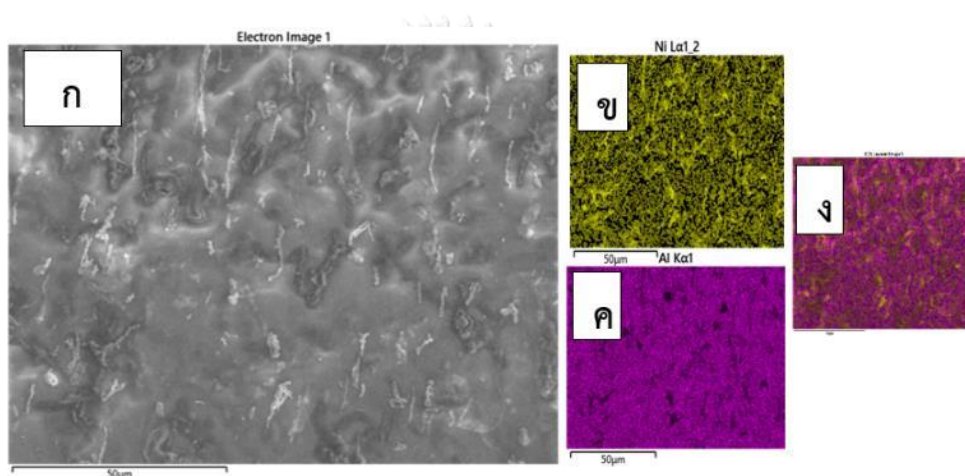
นิกเกิลบนสแตนเลส และกล่าวได้ว่าฟิล์มที่เคลือบลงบนสแตนเลสนั้นยังคงความเป็นอนุภาคนาโนนิกเกิลที่มีโครงสร้างผลึกเดิมไม่เปลี่ยนแปลง และไม่มี การก่อตัวของนิกเกิลออกไซด์ขึ้นในระหว่างกระบวนการเผาเนื่องจากในกระบวนการเผานั้นมีแก๊ส N_2 ไหลตลอดเวลา ส่งผลให้ไม่ปรากฏสัญญาณของนิกเกิลออกไซด์ ด้วยข้อจำกัดของการวิเคราะห์โดยใช้เทคนิค XRD จึงไม่ปรากฏสัญญาณของอะลูมินา อาจเนื่องมาจากอะลูมินามีการจัดเรียงโครงสร้างผลึกไม่เป็นระเบียบ การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD จึงไม่สามารถตรวจวัดได้ ผู้วิจัยจึงวิเคราะห์โดยใช้ Energy-dispersive X-ray spectroscopy (ED-XRF) เพื่อเป็นการยืนยันว่ามีฟิล์มอนุภาคนาโนนิกเกิล-อะลูมินาอยู่บนสแตนเลส จากรูปที่ 39 (ก) เป็น ED-XRF ของแผ่นสแตนเลสที่ยังไม่มีฟิล์มจะตรวจพบธาตุ Cr, Fe, Ni เท่านั้น ซึ่งเป็นโลหะผสมที่มีอยู่ในสแตนเลสไม่พบธาตุ Ni, Al และเมื่อเคลือบฟิล์มบนสแตนเลสแล้วดังรูป 39 (ข) จะพบว่ามีพีกของธาตุนิกเกิล และอะลูมินา ปรากฏเพิ่มขึ้นมา เป็นการยืนยันได้ว่ามีฟิล์มอนุภาคนาโนนิกเกิล-อะลูมินาอยู่บนสแตนเลสจริง ซึ่งสอดคล้องกับผล SEM-EDS จากรูป SEM 40 (ก) คือฟิล์มอนุภาคนาโนนิกเกิล-อะลูมินา แสดงให้เห็นการกระจายตัวของอนุภาคนาโนนิกเกิลที่มีลักษณะเป็นสายโซ่ในอะลูมินาเมทริกซ์ จากรูป EDS 40 (ข) สีเหลืองแสดงถึงการกระจายตัวของนิกเกิล (ค) สีม่วงแสดงการกระจายตัวของอะลูมินา (ง) แสดงการกระจายตัวของอนุภาคนาโนนิกเกิลในอะลูมินา สังเกตได้ว่าอนุภาคนาโนนิกเกิลกระจายอยู่ทั่วในอะลูมินาเมทริกซ์



รูปที่ 38 โครงสร้างผลึกของ (ก) สแตนเลสสตีล และ (ข) ฟิล์มอนุภาคนาโนนิกเกิล-อะลูมินา



รูปที่ 39 กราฟของ (ก) สแตนเลสสตีล และ (ข) ฟิล์มอนุภาคนาโนนิกเกิล-อะลูมินา



รูปที่ 40 ภาพ SEM-EDS ของฟิล์มนิกเกิลนาโนเชน-อะลูมินา (Ni nanochain – Al_2O_3)

4.2 ผลของโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของอนุภาคนาโนนิกเกิลที่เหมาะสมสำหรับตัวดูดซับพลังงานแสงอาทิตย์ (solar absorbers)

จากการสังเคราะห์อนุภาคนาโนนิกเกิลโดยมีอัตราส่วนของ $[\text{NaOH}]/[\text{NiCl}_2]$ แตกต่างกันดังนี้ ที่อัตราส่วน 4, 6, 8, 10, 12, 20 พบว่าที่แต่้อตราส่วนจะได้ขนาดและรูปร่างของอนุภาคนาโนนิกเกิลแตกต่างกัน ที่อัตราส่วนต่ำๆ จะพบอนุภาคนาโนนิกเกิลมีลักษณะคล้ายสายโซ่สั้นๆ เมื่อเพิ่มอัตราส่วนขึ้นไปสายโซ่ของอนุภาคนาโนจะยาวขึ้นและยาวที่สุดที่อัตราส่วนเท่ากับ 8 และพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของ NaOH ที่อัตราส่วนมากกว่านี้จะทำให้อนุภาคนาโนเริ่มรวมตัวกันจนเกิดเป็นลักษณะคล้ายทรงกลมเห็นได้ชัดเจนที่อัตราส่วนเท่ากับ 20 ซึ่งขนาดและรูปร่างที่แตกต่างกันของอนุภาคนาโนนิกเกิลส่งผลให้คุณสมบัติต่างๆ เปลี่ยนไปเช่น ไฟฟ้า, ความเป็นแม่เหล็ก, คุณสมบัติทางแสง ในงานวิจัยนี้สนใจที่จะศึกษาคุณสมบัติทางแสงของอนุภาคนาโนนิกเกิลที่มีขนาดและรูปร่างต่างกัน จึงนำอนุภาค

นาโนนิกเกิลมาใช้งานสำหรับตัวดูดซับพลังงานแสงอาทิตย์ (solar absorbers) เพื่อดูขนาดและรูปร่างที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้เป็นตัวดูดซับพลังงานแสงอาทิตย์โดยศึกษาหัวข้อดังต่อไปนี้

4.2.1 ผลของขนาดและรูปร่างของอนุภาคนาโนนิกเกิล

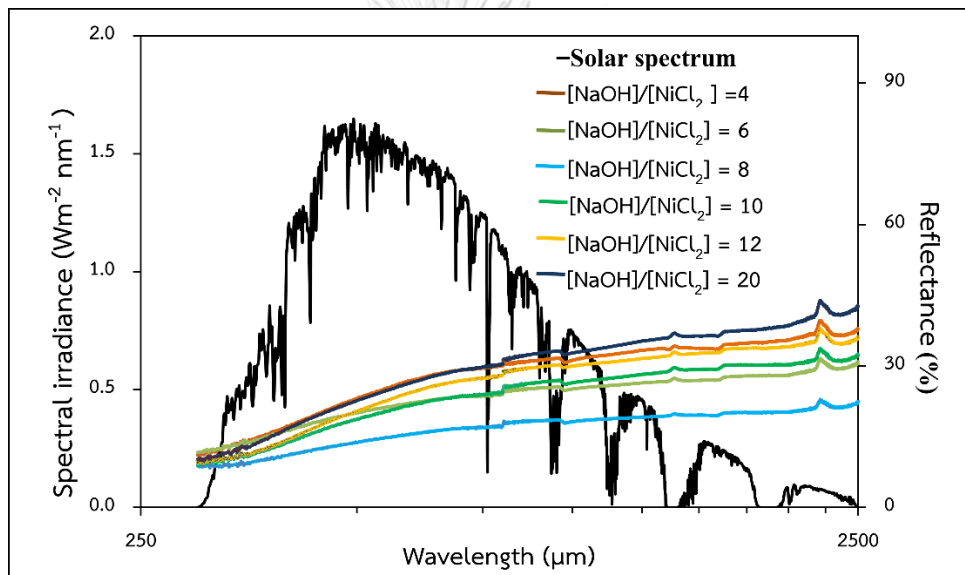
4.2.1.1 ค่าการดูดกลืนแสง (Solar absorptance)

จากการสังเคราะห์อนุภาคนาโนนิกเกิลสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ลักษณะคือ อนุภาคนาโนนิกเกิลสายโซ่สั้น, สายโซ่ยาว, ผสมระหว่างสายโซ่และอนุภาคคล้ายทรงกลม และอนุภาคคล้ายทรงกลมเพียงอย่างเดียว จากนั้นนำมาใช้งานเป็นตัวดูดซับพลังงานแสงอาทิตย์ อนุภาคนาโนนิกเกิลลักษณะต่างๆ ถูกนำมาเตรียมเป็นฟิล์มอนุภาคนาโนนิกเกิล-อะลูมินา เคลือบลงบนสแตนเลสเพื่อศึกษาผลของขนาดและรูปร่างที่มีผลกับคุณสมบัติทางแสงค่าการดูดกลืนแสงของฟิล์มอนุภาคนาโนนิกเกิล-อะลูมินา สามารถหาได้จากวัดการสะท้อนแสงของฟิล์มโดยใช้เครื่อง UV-Vis spectroscopy วัดที่ความยาวคลื่นตั้งแต่ 300 – 2500 นาโนเมตร (ความยาวคลื่นแสงอาทิตย์) จากนั้นมาคำนวณค่าการดูดกลืนแสงได้ตามสมการ รูปที่ 41 แสดงสเปกตรัมการสะท้อนแสงของฟิล์มบาง Ni nanochain- Al_2O_3 การเปรียบเทียบกับสเปกตรัมพลังงานแสงอาทิตย์ AM 1.5 กำหนดให้มีอนุภาคนาโนนิกเกิลคงที่ (0.05 กรัม) โดยใช้อนุภาคนาโนนิกเกิลที่มีขนาดและรูปร่างที่แตกต่างกันจากการสังเคราะห์ภายใต้อัตราส่วนของ $[NaOH]/[NiCl_2]$ ตั้งแต่ 4 ถึง 20 ผลแสดงให้เห็นถึงการสะท้อนแสงที่ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ อนุภาคนาโนที่สังเคราะห์อัตราส่วนเท่ากับ 4 ได้อนุภาคนิกเกิลมีลักษณะสายโซ่สั้นๆ ทำให้อนุภาคนิกเกิลครอบคลุมไม่ทั่วฟิล์ม เกิดการกระจายตัวของนิกเกิลบนฟิล์มแบบต่างๆ ส่งผลให้ได้ค่าการดูดกลืนแสงน้อยและที่อัตราส่วนโมลาร์ 10 อนุภาคนาโนมีทั้งสายโซ่สั้น ยาวและมีอนุภาคทรงกลมเกิดขึ้นอนุภาคนิกเกิลบางส่วนเกิดการรวมตัวกันตั้งแต่ขั้นตอนการสังเคราะห์ อนุภาคนิกเกิลจึงครอบคลุมไม่ทั่วฟิล์ม ส่งผลให้ค่าการดูดกลืนแสงที่ได้น้อยกว่าที่อัตราส่วนโมลาร์ 4 แสดงการดูดกลืนพลังงานแสงอาทิตย์ที่ 0.715 ± 0.017 และ 0.774 ± 0.003 ตามลำดับแสดงดังตารางที่ 2 ที่อัตราส่วนเท่ากับ 20 ให้ค่าการดูดกลืนแสงน้อยที่สุดคือ 0.701 ± 0.056 เนื่องจากอนุภาคนาโนนิกเกิลส่วนใหญ่มีลักษณะคล้ายทรงกลม เกิดจากการรวมตัวกันเป็นเม็ดกลมตั้งแต่ขั้นตอนการสังเคราะห์ทำให้เกิดการรวมตัวกันส่งผลให้กระจายตัวอยู่บนฟิล์มได้ไม่ดี แสดงดังรูป SEM 42 (ข) และเมื่อดูด้านข้างของฟิล์ม (cross-section) ก็สอดคล้องกันพบว่านิกเกิลมีการจับตัวเป็นก้อน ไม่กระจายตัวดังรูปที่ 43 (ข) เมื่อแสงมาตกกระทบบนฟิล์มแสงส่วนใหญ่จึงตกลงบนฟิล์มในส่วนที่เป็น Al_2O_3 มากกว่านิกเกิล ส่งผลให้เกิดการสะท้อนออกมากกว่าที่อัตราส่วนอื่นสังเกตได้ว่าเส้นกราฟที่

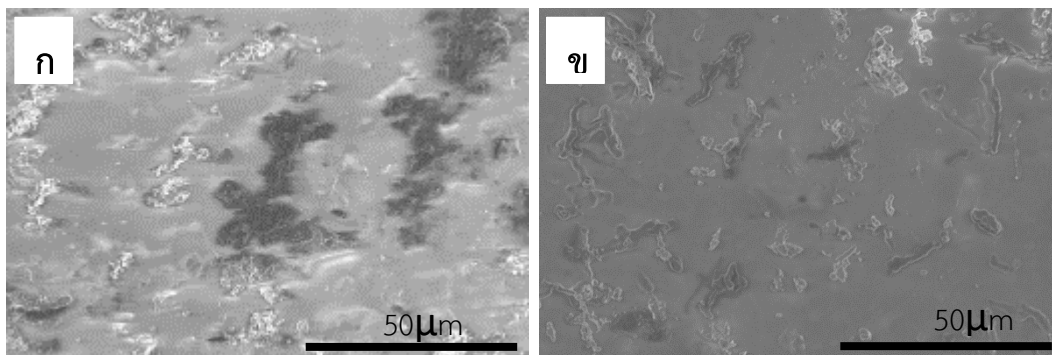
อัตราส่วน 20 จะอยู่เส้นบนสุดหมายถึงเกิดการสะท้อนแสงมากแสดงดังรูปที่ 41 (เส้นสีน้ำเงิน) เมื่อคำนวณเป็นค่าการดูดกลืนแสงค่าที่ได้จึงต่ำ

สมการคำนวณค่าการดูดกลืนแสง

$$\alpha = \frac{\int_{0.3\mu m}^{2.5\mu m} I_{sol}(\lambda)(1-R(\lambda))d\lambda}{\int_{3.0\mu m}^{2.5\mu m} I_{sol}(\lambda)d\lambda}$$

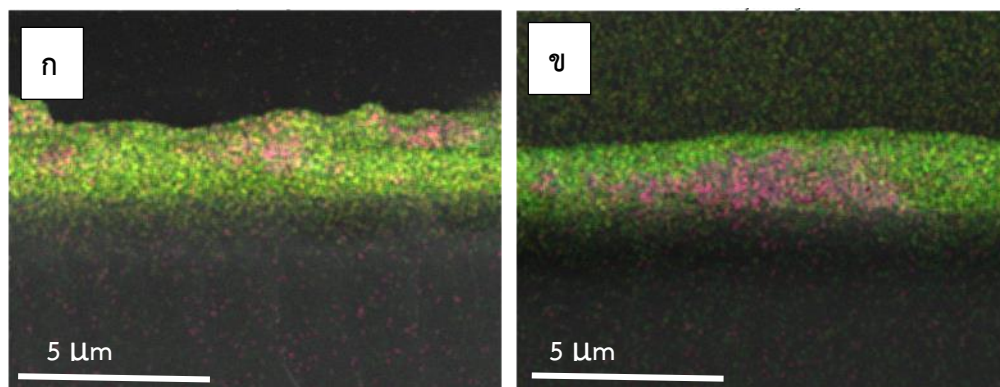


รูปที่ 41 แสดงสเปกตรัมการสะท้อนแสงของฟิล์มอนุภาคนาโนนิกเกิล-อะลูมินา เทียบกับสเปกตรัมพลังงานแสงอาทิตย์ AM 1.5 โดยมีอัตราส่วนของ NaOH ต่อ NiCl₂ ที่ต่างกัน



รูปที่ 42 รูป SEM แสดงการกระจายตัวของอนุภาคนาโนนิกเกิลในฟิล์ม (ก) ฟิล์มอนุภาคนิกเกิล-อะลูมินา ที่อัตราส่วน $[\text{NaOH}]/[\text{NiCl}_2] = 8$ (ข) ฟิล์มอนุภาคนาโนนิกเกิลที่อัตราส่วน $[\text{NaOH}]/[\text{NiCl}_2] = 20$ (ข)

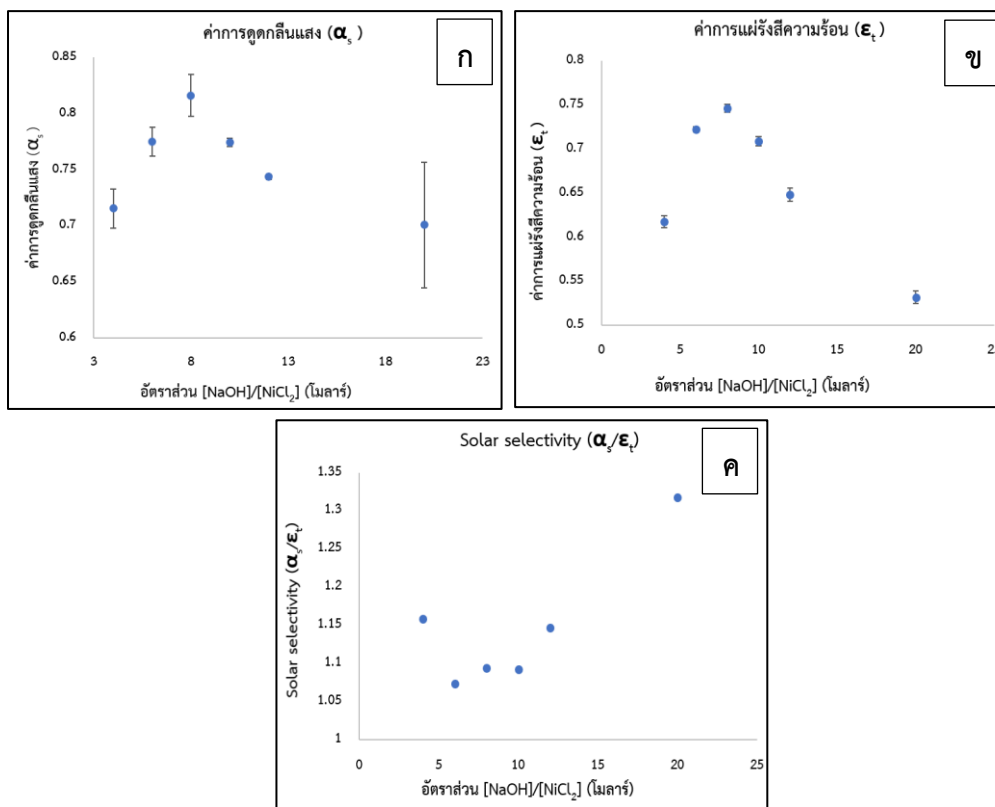
ที่อัตราส่วนโมลาร์เท่ากับ 8 ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับพลังงานแสงอาทิตย์ที่ดีที่สุดด้วยการดูดซับพลังงานแสงอาทิตย์ที่ 0.816 ± 0.019 แสดงดังตารางที่ 2 อธิบายได้โดยจากการกระจายตัวของอนุภาคนาโนนิกเกิลบนพื้นผิวฟิล์ม Ni nanochain- Al_2O_3 แสดงดังรูปที่ 42 (ก) เนื่องจากอนุภาคนาโนนิกเกิลมีลักษณะเป็นสายโซ่ยาวทำให้เกิดการแผ่กระจายตัวอยู่บนฟิล์มได้ดีกว่า และสังเกตได้จากรูปที่ 43 (ก) เป็นภาพตัดขวางด้านข้างของฟิล์ม (cross-section) เห็นได้ว่านิกเกิลมีการกระจายตัวที่ดีกว่าที่อัตราส่วน 20 นิกเกิลที่มีลักษณะทรงกลมเมื่อแสงมาตกกระทบบนฟิล์มแสงส่วนใหญ่จึงตกลงบนฟิล์มในส่วนที่เป็นนิกเกิลมากกว่าอะลูมินาแสงที่เข้ามาจะเกิดการสะท้อนออกน้อยกว่า การเป็นสายโซ่ยาวของนิกเกิลส่งผลให้แสงเกิดการสะท้อนไป-มา (multi-scattering) [73] ภายในสายโซ่ ทำให้ลดการสูญเสียแสงจะสะท้อนออกช่วยให้ค่าการดูดกลืนแสงเพิ่มขึ้น สังเกตได้จากเส้นกราฟที่อัตราส่วน 8 (เส้นสีฟ้า) จะอยู่เส้นล่างสุดแสดงดังรูปที่ 41 หมายถึงเกิดการสะท้อนแสงได้น้อยในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 300 – 2500 นาโนเมตร เมื่อคำนวณเป็นค่าการดูดกลืนแสงค่าที่ได้จึงมากกว่าที่อัตราส่วนอื่น สามารถสรุปค่าการดูดกลืนแสงได้แสดงดังรูปที่ 41 โดยที่อัตราส่วน $[\text{NaOH}]/[\text{NiCl}_2]$ เท่ากับ 20 ได้ค่าการดูดกลืนแสงต่ำสุดและที่อัตราส่วน $[\text{NaOH}]/[\text{NiCl}_2]$ เท่ากับ 8 ได้ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดและจากรูปที่ 44 (ก) สังเกตได้ว่าเมื่อสายโซ่ของอนุภาคนาโนนิกเกิลยาวขึ้นค่าดูดกลืนแสงก็จะเพิ่มขึ้น และเมื่อความยาวของสายโซ่ลดลงและเริ่มมีการผสมระหว่างสายโซ่กับอนุภาคคล้ายทรงกลมค่าการดูดกลืนแสงก็จะลดลง



รูปที่ 43 รูป SEM แสดงการกระจายตัวของอนุภาคนาโนนิกเกิลในฟิล์มแบบcross-section (ก) ฟิล์มอนุภาคนิกเกิล-อะลูมินาที่อัตราส่วน $[\text{NaOH}]/[\text{NiCl}_2] = 8$ (ก) ฟิล์มอนุภาคนาโนนิกเกิลที่อัตราส่วน $[\text{NaOH}]/[\text{NiCl}_2] = 20$ (ข)

ตารางที่ 2 แสดงค่าการดูดกลืนแสง, ค่าการปล่อยรังสีความร้อน และ solar selectivity ที่อัตราส่วน $[\text{NaOH}]/[\text{NiCl}_2]$ ต่างกัน

$[\text{NaOH}]/[\text{NiCl}_2]$	ความหนาฟิล์ม (μm)	ค่าการดูดกลืนแสง, α_s (0.3 to 2.5 μm)	ค่าการปล่อยรังสีความร้อน, ϵ_t (85°C)	Solar selectivity (α_s/ϵ_t)
4	2.728 ± 0.139	0.715 ± 0.017	0.618 ± 0.007	1.158
6	2.792 ± 0.039	0.775 ± 0.013	0.722 ± 0.003	1.073
8	2.718 ± 0.073	0.816 ± 0.019	0.746 ± 0.004	1.094
10	2.908 ± 0.171	0.774 ± 0.003	0.709 ± 0.005	1.092
12	2.542 ± 0.039	0.744 ± 0.002	0.648 ± 0.008	1.147
20	2.939 ± 0.304	0.701 ± 0.056	0.532 ± 0.007	1.317



รูปที่ 44 กราฟแสดงค่าการดูดกลืนแสง ค่าการแผ่รังสีความร้อน ค่า Solar selectivity ที่อัตราส่วน [NaOH]/[NiCl₂] แตกต่างกัน

4.2.1.2 ค่าการแผ่รังสีความร้อน (Thermal emittance)

ค่าการแผ่รังสีความร้อนสามารถวัดได้โดยใช้เครื่อง Emissometer ตัวดูดซับพลังงานแสงอาทิตย์ที่ดีควรมีการแผ่รังสีความร้อนต่ำ การแผ่รังสีความร้อนที่วัดได้แสดงดังตารางที่ 2 ที่อัตราส่วนโมลาร์เท่ากับ 20 มีค่าการแผ่รังสีความร้อนต่ำเนื่องจากแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบลงบนฟิล์มส่วนมากไม่โดนบริเวณที่เป็นนิกเกิล เนื่องจากนิกเกิลมีการรวมตัวกันเป็นเม็ดกลมตั้งแต่ขั้นตอนการสังเคราะห์ที่ไม่เป็นสายโซ่ จึงส่งผลให้นิกเกิลแผ่กระจายไม่ทั่วฟิล์มทำให้เกิดเป็นความร้อนน้อยกว่าที่สัดส่วนอื่นมีค่าการปลดปล่อยความร้อนเท่ากับ 0.532 ± 0.007 และมีค่าการเลือกพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar selectivity) สูงสุดที่ 1.317 แม้อัตราส่วนที่ 20 แสดงถึงค่าการแผ่รังสีความร้อนต่ำก็จริง แต่มีปัจจัยอื่นอีกมากมายที่ต้องพิจารณา เช่น ค่าการนำความร้อน ค่าการดูดกลืนแสง เป็นต้น อย่างไรก็ตามอนุภาคนาโนที่มีลักษณะเป็นสายโซ่ (อัตราส่วน 4, 6, 8, 10, 12) จะแผ่กระจายทั่วฟิล์มได้มากกว่านิกเกิลทรงกลมโอกาสที่แสงอาทิตย์ตกกระทบนิกเกิลจึงมาก กว่านิกเกิลมีสมบัติ

การสะท้อนแสงน้อยในช่วงความยาวคลื่น UV-Vis จึงสามารถดูดซับแสงอาทิตย์ไว้ได้มากส่งผลให้มีความร้อนเกิดขึ้นที่ฟิล์มสูง จากรูปที่ 44 (ข) สังเกตได้ว่าเมื่อสายโซ่ของอนุภาคนาโน निकเกลยาวขึ้นค่าการแผ่รังสีความร้อนก็จะเพิ่มขึ้น และเมื่อความยาวของสายโซ่ลดลงและเริ่มมีการผสมระหว่างสายโซ่กับอนุภาคคล้ายทรงกลมค่าการแผ่รังสีความร้อนก็จะลดลง โดยมีค่าการปลดปล่อยความร้อนเท่ากับ 0.618 ± 0.007 , 0.722 ± 0.003 , 0.746 ± 0.004 , 0.709 ± 0.005 , 0.648 ± 0.008 ตามลำดับ และจากรูปที่ 44 (ง) สังเกตได้ว่าเมื่อสายโซ่ของอนุภาคนาโน निकเกลยาวขึ้นค่าการแผ่รังสีความร้อนก็จะเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า Solar selectivity ลดลง โดยมีค่าการเลือกพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar selectivity) เท่ากับ 1.158, 1.073, 1.094, 1.092, 1.147 ตามลำดับ แต่ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยสนใจค่าการดูดกลืนแสง (Solar absorptance) และค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) มากกว่า และได้สังเกตเห็นว่าอนุภาคนาโน निकเกลที่เป็นสายโซ่นั้นช่วยให้ค่าการดูดกลืนแสงเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

4.2.1.3 ค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity)

การวัดค่าการนำความร้อนของฟิล์มหรือค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal conductivity) คือค่าที่แสดงความสามารถในการถ่ายเทความร้อนด้วยการนำความร้อนของวัสดุ มีหน่วยเป็น $W/(m \cdot K)$ ยิ่งมีค่ามากก็หมายถึงวัสดุสามารถนำความร้อนได้ดีมาก ในงานวิจัยนี้ได้จำลองวิธีการวัดค่าการนำความร้อนของฟิล์มแสดงดังรูปที่ 45 โดยกำหนดให้เป็นค่า k_f ซึ่งหมายถึงค่าการนำความร้อนของฟิล์มโดยสามารถคำนวณได้จากสมการ ซึ่ง q คือพลังงานความร้อนที่ให้แก่ฟิล์มใช้เป็นหลอด Halogen (100 W, 230 v) จำลองเป็นแสงอาทิตย์โดยวางให้ได้ระยะสูงเหนือฟิล์มที่ให้ความเข้มแสงเท่ากับ $1000 W/m^2$ เนื่องจากเป็นค่ามาตรฐานความเข้มของแสงอาทิตย์ที่ส่องมายังโลกโดยใช้ Solar power meter ในการวัด L_1, L_2 หมายถึงความหนาฟิล์มมีหน่วยเป็นเมตร (m) วัดความหนาด้วยเครื่อง SEM และความหนาเสตนเลสวัดโดยเวอร์เนียตามลำดับ A_1, A_2 หมายถึงพื้นที่ฟิล์มมีหน่วยเป็นตารางเมตร (m^2) และพื้นที่แผ่นเสตนเลสตามลำดับ k_{ss} คือค่าการนำความร้อนของแผ่นเสตนเลสมีหน่วยเป็นวัตต์ต่อเมตร-เคลวิน ($W/m \cdot K$) T_1, T_3 คืออุณหภูมิที่วัด ณ หน้าที่ที่ 30 ซึ่งอุณหภูมิของระบบจะคงที่ (Steady-state) โดยวัดด้านบน (วัดที่ฟิล์ม) มีหน่วยเป็นเคลวิน (K) และอุณหภูมิวัดด้านล่าง (วัดที่เสตนเลส) ตามลำดับ โดยใช้ Thermocouple วางไว้ด้านบนอีกอันวางด้านล่างและอ่านค่าจาก Thermometers โดยจะอ่านอุณหภูมิทุกๆ 1 นาทีเป็นเวลา 30 นาที จะได้กราฟแสดงการนำความร้อนของฟิล์มอนุภาคนาโน निकเกล-อะลูมินา แสดงดังรูปที่ 46 และ 49

$$k_f = \frac{q \cdot L_1}{A_1 \cdot [(T_1 - T_3) - \left(\frac{q \cdot L_2}{K_{SS} \cdot A_2}\right)]}$$

k_f คือค่าการนำความร้อนของฟิล์ม (W/m·K)

q คือพลังงานความร้อนให้แก่ฟิล์มมีค่าเท่ากับ 1000 W/m²

L_1, L_2 คือความหนาฟิล์ม (m)

A_1, A_2 คือพื้นที่ฟิล์มและสเตนเลส (m²)

k_{SS} คือค่าการนำความร้อนของแผ่นสเตนเลส (W/m·K)

T_1, T_3 คืออุณหภูมิวัดด้านบน (วัดที่ฟิล์ม) และอุณหภูมิวัดด้านล่าง วัดที่สเตนเลส (K)

จากรูปที่ 46 กราฟแสดงผลต่างของอุณหภูมิฟิล์มอนุภาคนิกเกิล-อะลูมินา ที่อัตราส่วนต่างๆ พบว่าตัวสเตนเลสที่ไม่มีฟิล์มเส้นกราฟของ T_1 และ T_3 (เส้นสีเหลือง) ห่างกันมากมีค่าผลต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยสูงแสดงดังตารางที่ 3 เนื่องจากสเตนเลสนำความร้อนได้ไม่ดีทำให้ความร้อนส่งผ่านมายังด้านล่างของสเตนเลสไม่ดี อีกทั้งสเตนเลสมีการสะท้อนแสงสูงจึงทำให้แสงส่วนใหญ่เกิดการสะท้อนออกไม่เกิดการดูดกลืนแสงอุณหภูมิที่วัดได้จึงต่ำ แต่พบว่าเมื่อมีฟิล์มอนุภาคนิกเกิล-อะลูมินาทำให้อุณหภูมิที่วัดได้สูงขึ้น และเส้นกราฟ T_1 และ T_3 ชิดกันมากขึ้นเนื่องจากนิกเกิลช่วยส่งผ่านความร้อนดี และนิกเกิลมีคุณสมบัติช่วยในการดูดกลืนแสงเมื่อมีแสงตกกระทบมายังฟิล์ม นิกเกิลจะช่วยดูดซับแสงได้มากแสงจะถูกเปลี่ยนไปเป็นพลังงานความร้อนอุณหภูมิที่วัดได้จึงสูง และมีอะลูมินาที่มีคุณสมบัติเก็บความร้อนดีจึงทำให้เกิดการแผ่รังสีความร้อนต่ำ จากกราฟแสดงดังรูปที่ 46 ฟิล์มอนุภาคนิกเกิล-อะลูมินาเทียบกัน โดยใช้ นิกเกิลที่ได้จากการสังเคราะห์ที่อัตราส่วน [NaOH]/[NiCl₂] ต่างกัน ที่อัตราส่วนเท่ากับ 20 เส้นกราฟ T_1 และ T_3 (เส้นสีเขียว) ห่างกันมากกว่าที่อัตราส่วนอื่นและมีค่าผลต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยสูงเนื่องจากการสังเคราะห์นิกเกิลที่อัตราส่วนนี้ได้ นิกเกิลส่วนใหญ่ที่มีลักษณะเป็นเม็ดคล้ายทรงกลม มีสายโซ่สั้นๆ มากส่งผลให้การส่งผ่านความร้อนมายังด้านล่างของแผ่นสเตนเลสไม่ดีคำนวณหาค่า k_f ได้เท่ากับ 0.0019 W/m·K ที่อัตราส่วน 4, 6 ได้ นิกเกิลเป็นสายโซ่สั้นๆ พบว่าเส้นกราฟ T_1 และ T_3 แคบกว่าที่อัตราส่วน 20 แสดงให้เห็นว่านิกเกิลที่เป็นสายโซ่ช่วยการส่งผ่านความร้อนได้ดีกว่านิกเกิลที่เป็นทรงกลมเมื่อคำนวณหาค่า k_f ได้เท่ากับ 0.0026 และ 0.0033 W/m·K ตามลำดับ ที่อัตราส่วน 10, 12 มีนิกเกิลที่มีทั้งสายโซ่สั้นยาว เมื่อเทียบกับอัตราส่วนที่ 4, 6 พบสายโซ่มากกว่าและยาวกว่าส่งผลให้เส้นกราฟ T_1 และ T_3 แคบกว่าที่อัตราส่วน 4, 6 ให้ค่า k_f เพิ่มขึ้นเป็น 0.0034 และที่อัตราส่วนเท่ากับ 8 สังเกตเห็นได้ว่าเส้นกราฟ T_1 และ T_3 (เส้นสีแดง) แคบกว่าอัตราส่วนอื่นเนื่องจากที่อัตราส่วนนี้อนุภาคนิกเกิลมีลักษณะเป็นสายโซ่ยาวจึงช่วยให้การส่งผ่านความร้อนไปด้านล่างของสเตนเลสได้ดีกว่า ผลต่างอุณหภูมิมีน้อยมาก

เมื่อนำมาคำนวณเป็นค่า k_f ได้เท่ากับ $0.0061 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ จากการทดลองวัดค่าการนำความร้อนนี้พบว่า ความยาวสายโซ่ของอนุภาคนาโนนิกเกิลมีผลต่อการส่งผ่านความร้อนของฟิล์มและมีผลกับค่า k_f

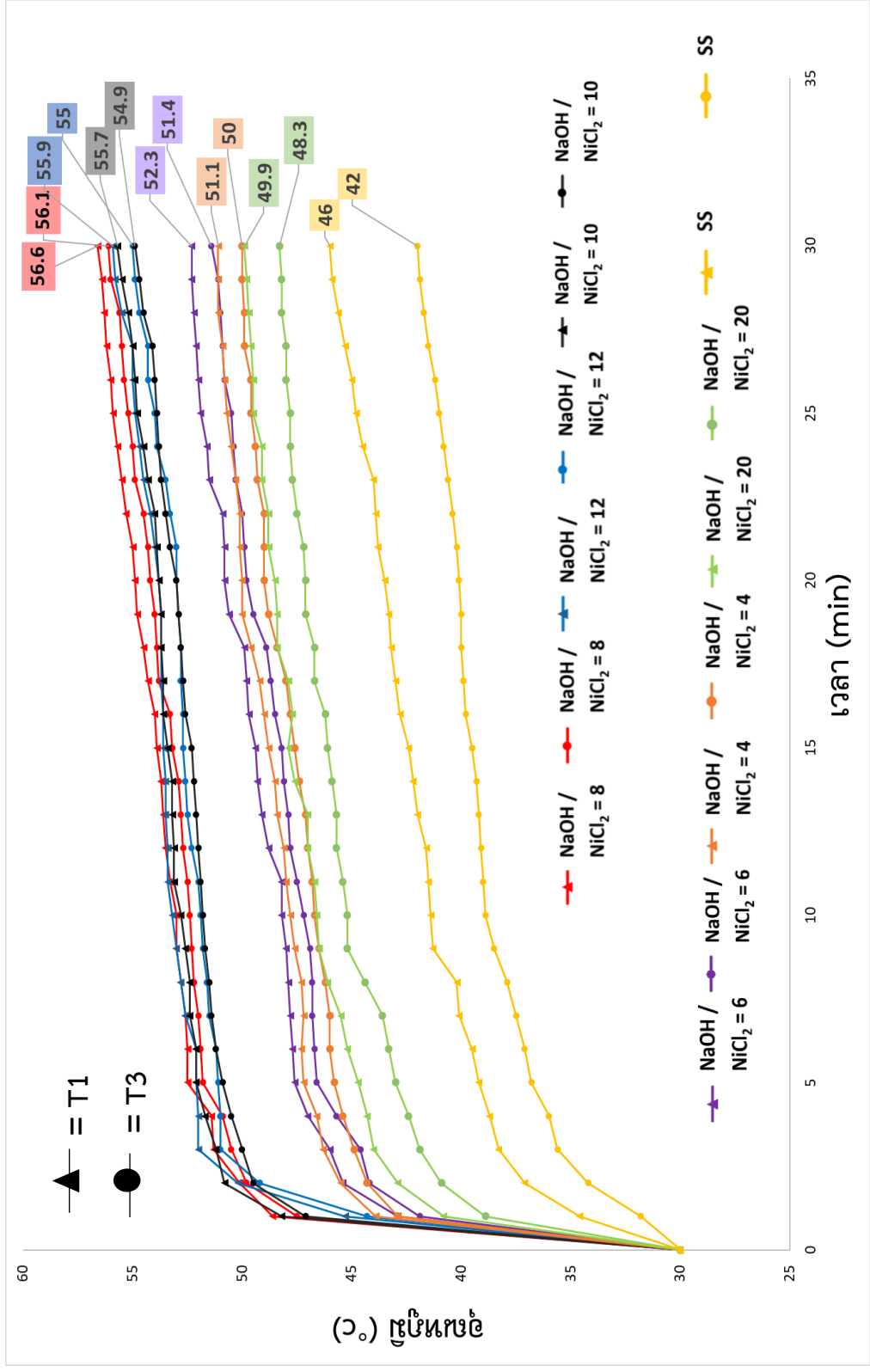


รูปที่ 45 แสดงวิธีการทดลองเพื่อคำนวณหาค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) ของฟิล์มอนุภาคนิกเกิล-อะลูมินา

ตารางที่ 3 แสดงอุณหภูมิ T1, T2, ค่าเฉลี่ย ΔT ความหนาฟิล์ม และ ค่า k_f ของฟิล์มอนุภาคนาโนนิกเกิลนา-อะลูมินา ที่อัตราส่วน $[\text{NaOH}]/[\text{NiCl}_2]$ แตกต่างกัน

CHULALONGKORN UNIVERSITY

NaOH/NiCl ₂ (molar)	T1 (C°) (ณ นาทีที่ 30)	T3 (C°) (ณ นาที ที่30)	ค่าเฉลี่ย ΔT (C°) (นาทีที่ 1-30)	ความหนาฟิล์ม (μm)	k_f W/m·K
4	51.1	50.0	1.1	2.728 ± 0.139	0.0026
6	52.3	51.4	1.0	2.792 ± 0.039	0.0033
8	56.6	56.1	0.6	2.718 ± 0.073	0.0061
10	55.7	54.9	0.9	2.908 ± 0.171	0.0034
12	55.9	55.0	0.9	2.542 ± 0.039	0.0034
20	49.9	48.3	1.5	2.939 ± 0.304	0.0019

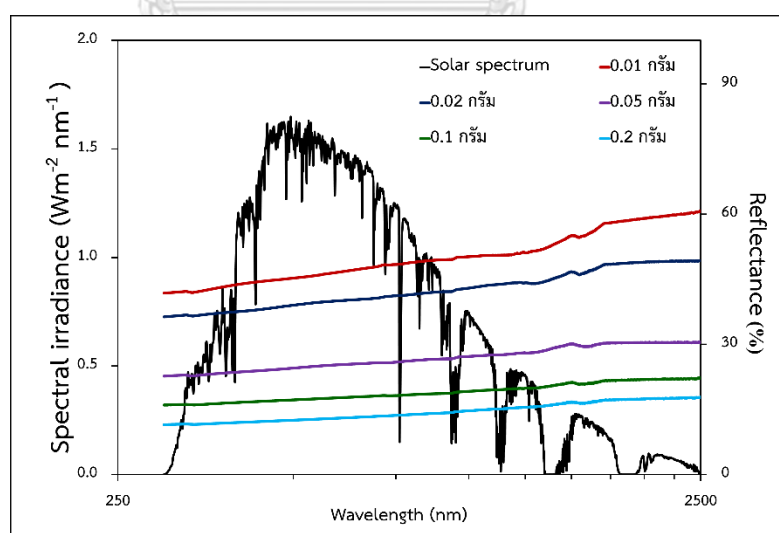


รูปที่ 46 กราฟแสดงผลต่างของอุณหภูมิที่ล้นออกมาในนิกเกิล-อะลูมินา ที่อัตราส่วน [NaOH]/[NiCl₂] แตกต่างกัน

4.2.2 ผลของปริมาณอนุภาคนาโนนิกเกิล

4.2.2.1 ค่าการดูดกลืนแสง (Solar absorptance)

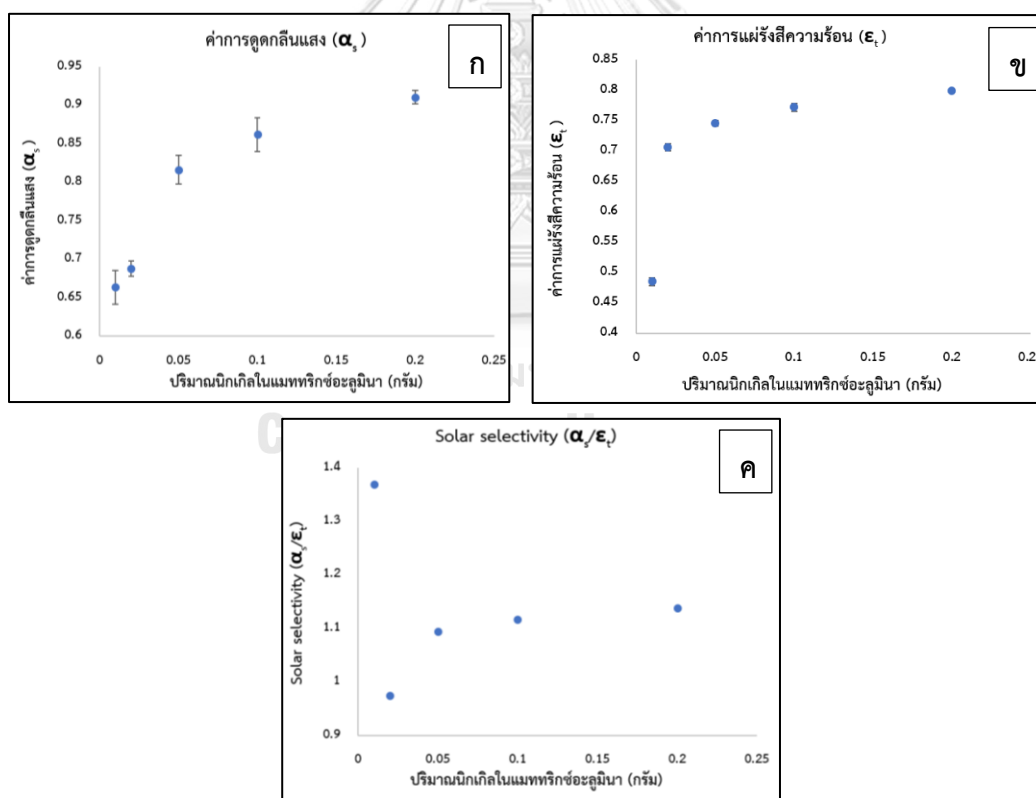
การสังเคราะห์อนุภาคนาโนนิกเกิลที่อัตราส่วนโมลาร์เท่ากับ 8 ได้เป็นสายโซ่ยาวมากกว่าที่อัตราส่วนอื่นอีกทั้งที่อัตราส่วนนี้ให้ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดเนื่องจากนิกเกิลที่เป็นสายโซ่นั้นช่วยให้การแผ่กระจายบนฟิล์มได้ดีกว่านิกเกิลที่เป็นทรงกลม และการเป็นสายโซ่ยาวของนิกเกิลช่วยให้แสงเกิดการสะท้อนไปมา (multi-scattering) [73] ภายในสายโซ่ลดการสูญเสียที่แสงสะท้อน และสังเกตเห็นได้ว่าค่าการดูดกลืนแสงของฟิล์มนั้นขึ้นกับนิกเกิลที่อยู่ในอะลูมินาเมทริกซ์ ทางผู้วิจัยเพิ่มปริมาณอนุภาคนาโนนิกเกิลลงไปในอะลูมินาเมทริกซ์เป็น 0.1, 0.2 กรัม พบว่าบนฟิล์มมีปริมาณนิกเกิลหนาแน่นมากขึ้นกระจายอยู่ทั่วฟิล์มได้มากขึ้นเมื่อแสงอาทิตย์ตกกระทบบนฟิล์มแสงเกิดการสะท้อนน้อยลงดูจากกราฟการสะท้อนแสงแสดงดังรูปที่ 47 (เส้นสีเขียว, ฟ้ำตามลำดับ) เมื่อนำมาคำนวณค่าการดูดกลืนแสงได้ค่าการดูดกลืนแสงเพิ่มขึ้นเป็น 0.862 ± 0.022 , 0.910 ± 0.009 ตามลำดับแสดงดังตารางที่ 4 แต่เมื่อทำการลดปริมาณอนุภาคนาโนนิกเกิลเป็น 0.01, 0.02 กรัม แสงเกิดการสะท้อนเพิ่มขึ้นดูจากกราฟการสะท้อนแสงแสดงดังรูปที่ 47 (เส้นสีแดง, น้ำเงินตามลำดับ) ค่าการดูดกลืนแสงจึงลดลงเป็น 0.664 ± 0.022 , 0.688 ± 0.010 แสดงดังตารางที่ 4 และจากรูปที่ 48 (ก) สังเกตได้ว่าปริมาณของอนุภาคนาโนนิกเกิลมีผลต่อค่าการดูดกลืนอย่างมากเมื่อปริมาณอนุภาคนาโนเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าการดูดกลืนแสงของฟิล์มนิกเกิลนาโนเซน-อะลูมินาเพิ่มขึ้นด้วย



รูปที่ 47 แสดงสเปกตรัมการสะท้อนแสงของฟิล์มอนุภาคนาโนนิกเกิล-อะลูมินา เทียบกับสเปกตรัมพลังงานแสงอาทิตย์ AM 1.5 โดยมีปริมาณอนุภาคนาโนนิกเกิลในอะลูมินาที่ต่างกัน

ตารางที่ 4 แสดงค่าการดูดกลืนแสง, ค่าการปล่อยรังสีความร้อน และ solar selectivity โดยมีปริมาณอนุภาคนาโนนิกเกิลในอะลูมินาที่ต่างกัน

ปริมาณนิกเกิล ในเมทริกซ์ อะลูมินา (กรัม)	ความหนาฟิล์ม (μm)	ค่าการดูดกลืนแสง , α_s (0.3 to 2.5 μm)	ค่าการปล่อยรังสี ความร้อน, ϵ_t (85°C)	Solar selectivity (α_s/ϵ_t)
0.01	2.654 ± 0.128	0.664 ± 0.022	0.485 ± 0.006	1.369
0.02	2.487 ± 0.041	0.688 ± 0.010	0.706 ± 0.006	0.974
0.05	2.718 ± 0.073	0.816 ± 0.019	0.746 ± 0.005	1.094
0.1	2.581 ± 0.125	0.862 ± 0.022	0.772 ± 0.006	1.116
0.2	2.654 ± 0.094	0.910 ± 0.009	0.799 ± 0.002	1.138



รูปที่ 48 แสดงค่าการดูดกลืนแสง, ค่าการปล่อยรังสีความร้อน และ solar selectivity โดยมีปริมาณอนุภาคนาโนนิกเกิลในอะลูมินาที่ต่างกัน

4.2.1.2 ค่าการแผ่รังสีความร้อน (Thermal emittance)

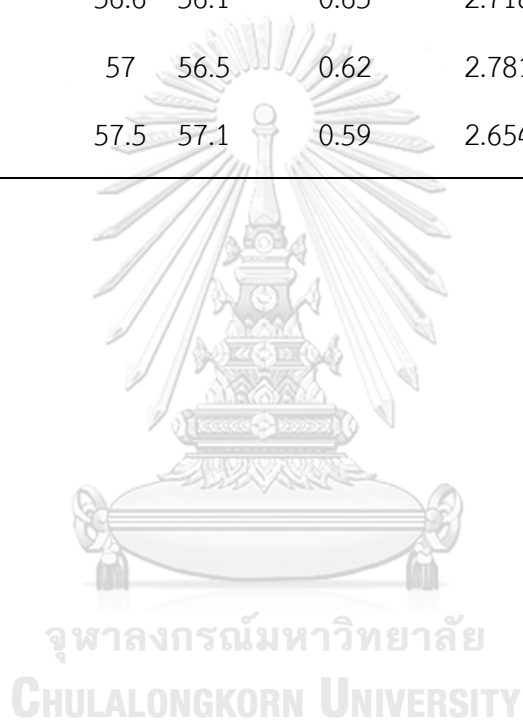
ที่อัตราส่วนโมลาร์เท่ากับ 8 พบว่าเมื่อปริมาณของอนุภาคนาโนนิกเกิลเพิ่มขึ้นนอกจากจะมีผลต่อค่าการดูดกลืนแสงแล้วยังมีผลต่อค่าการแผ่รังสีความร้อนด้วยพบว่าเมื่อฟิล์มมีปริมาณอนุภาคนาโนนิกเกิลเพิ่มขึ้นเป็น 0.01, 0.02, 0.05, 0.1, 0.2 กรัม ส่งผลให้ค่าการแผ่รังสีความร้อนเพิ่มขึ้นเท่ากับ 0.485 ± 0.006 , 0.706 ± 0.006 , 0.746 ± 0.005 , 0.772 ± 0.006 , 0.799 ± 0.002 แสดงดังตารางที่ 4 และจากรูปที่ 48 (ข) สังเกตได้ว่าเนื่องจากปริมาณของอนุภาคนาโนนิกเกิลในฟิล์มเพิ่มขึ้นทำให้บนฟิล์มมีปริมาณนิกเกิลหนาแน่นมากขึ้นเมื่อมีแสงฟิล์มจึงดูดซับแสงได้ดีขึ้นความร้อนที่เกิดขึ้นที่ฟิล์มมากส่งผลให้ค่าการแผ่รังสีความร้อนเพิ่มขึ้น และจากรูปที่ 48 (ง) สังเกตได้ว่าเมื่อค่าการแผ่รังสีความร้อนเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า Solar selectivity ลดลง โดยมีค่าการเลือกพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar selectivity) เท่ากับ 1.369, 0.974, 1.094, 1.116, 1.138 ตามลำดับ

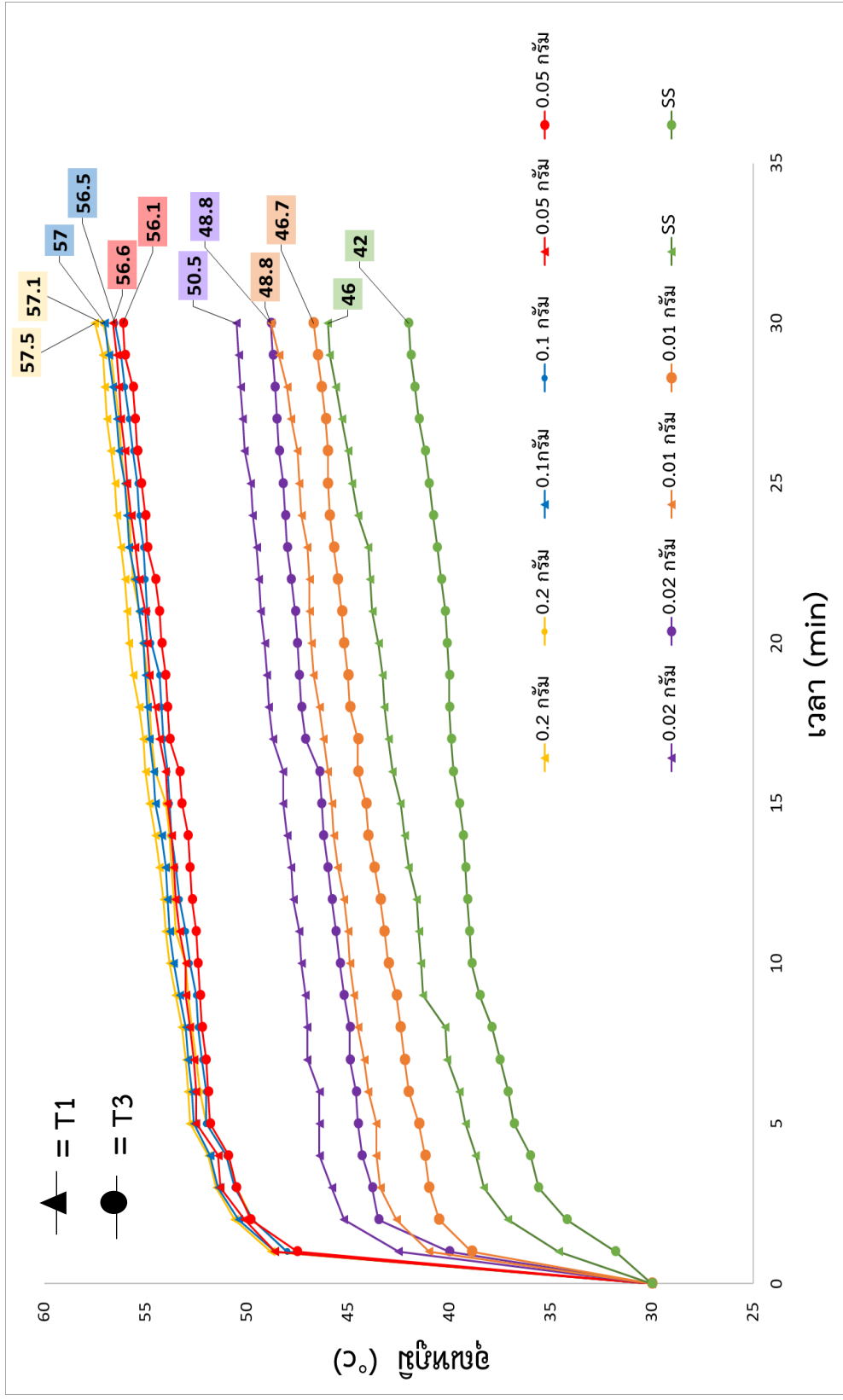
4.2.2.3 ค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity)

จากรูปที่ 49 กราฟแสดงผลต่างของอุณหภูมิฟิล์มอนุภาคนาโนนิกเกิล-อะลูมินา โดยมีปริมาณนิกเกิลในอะลูมินาที่ต่างกัน 0.01, 0.02, 0.05, 0.1, 0.2 กรัม พบว่าถ้าปริมาณนิกเกิลมากขึ้นเส้นกราฟของ T1 และ T3 จะแคบขึ้นและมีค่าผลต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยลดลงแสดงดังตารางที่ 5 เนื่องจากเมื่อมีปริมาณของนิกเกิลมากขึ้นทำให้ความร้อนส่งผ่านมายังด้านล่างของสแตนเลสได้ดีขึ้นคำนวณหา k_f ได้เท่ากับ 0.0013, 0.0016, 0.0061, 0.0063, 0.0077 W/m-K พบว่าปริมาณอนุภาคนาโนนิกเกิลมีผลต่อการส่งผ่านความร้อนของฟิล์มและมีผลกับค่า k_f อย่างมีนัยสำคัญ และจากการทดลองสามารถใส่ปริมาณ Ni ได้สูงสุดเพียงแค่ 0.2 กรัม เนื่องจากข้อจำกัดเรื่องการละลายของนิกเกิลในสารละลายอะลูมินาพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณนิกเกิลมากกว่า 0.2 กรัม นิกเกิลไม่สามารถละลายได้และจับตัวกันเป็นก้อน

ตารางที่ 5 แสดงอุณหภูมิ T1, T2, ค่าเฉลี่ย ΔT ความหนาฟิล์ม และ ค่า k_f ของฟิล์มอนุภาคนาโน นิกเกิล-อะลูมินา โดยมีปริมาณ Ni แตกต่างกัน

ปริมาณ Ni ในเมทริกซ์ Al_2O_3 (กรัม)	T1 ($^{\circ}C$)	T3 ($^{\circ}C$)	ค่าเฉลี่ย ΔT ($^{\circ}C$)	ความหนาฟิล์ม (μm)	k_f (W/m·K)
0.01	48.8	46.7	1.74	2.654 ± 0.128	0.0013
0.02	50.5	48.8	1.74	2.562 ± 0.041	0.0016
0.05	56.6	56.1	0.65	2.718 ± 0.073	0.0061
0.1	57	56.5	0.62	2.781 ± 0.125	0.0063
0.2	57.5	57.1	0.59	2.654 ± 0.094	0.0077





รูปที่ 49 กราฟแสดงผลต่างของอุณหภูมิของฟิล์มอนุภาคนาโนเมทิล-อะซิเตต-อะซิเตตต่างกัน โดยมีปริมาณเมทิล-อะซิเตตต่างกัน

บทที่ 5 สรุปผลและอภิปราย

5.1 สรุปผล

1. อนุภาคนาโนนิกเกิลสังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยารีดักชันโดยอัตราส่วนของ $[\text{NaOH}]/[\text{NiCl}_2]$ ที่ 4, 6, 8, 10, 12, 20 มีผลกับขนาดและรูปร่างของอนุภาคนาโนนิกเกิลแตกต่างกัน พบว่าอัตราส่วนต่างๆ ที่อัตราส่วน 4, 6 จะได้อนุภาคนาโนนิกเกิลเป็นสายโซ่สั้นๆ เมื่อเพิ่มอัตราส่วนขึ้นไปสายโซ่ของอนุภาคนาโนจะยาวขึ้นและยาวที่สุดที่อัตราส่วนเท่ากับ 8 มีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวเฉลี่ยประมาณ 284 ± 72 นาโนเมตรและ 2.16 ± 1.10 ไมโครเมตรตามลำดับ และพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของ NaOH ที่อัตราส่วนมากกว่า 8 จะทำให้อนุภาคนาโนเริ่มรวมตัวกันจนเกิดเป็นลักษณะคล้ายทรงกลมอย่างเห็นได้ชัดจนที่อัตราส่วนเท่ากับ 20 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้นเป็น 527 ± 130 นาโนเมตร
2. ขนาดและรูปร่างที่ต่างกันของอนุภาคนาโนนิกเกิลส่งผลให้คุณสมบัติทางแสงเปลี่ยนไป พบว่าขนาดและรูปร่างของอนุภาคนาโนนิกเกิลที่เหมาะสมใช้เป็นฟิล์มนิกเกิลนาโนเชน – อะลูมินา (Ni nanochain- Al_2O_3) สำหรับตัวดูดซับพลังงานแสงอาทิตย์ (solar absorbers) คืออนุภาคนาโนนิกเกิลที่สังเคราะห์อัตราส่วนเท่ากับ 8 เนื่องจากอนุภาคนาโนนิกเกิลมีลักษณะเป็นสายโซ่ยาวทำให้เกิดการแผ่กระจายตัวอยู่บนฟิล์มได้ดีให้ค่าการดูดกลืนแสง (Solar absorptance) สูงถึง 0.910 ± 0.009 และให้ค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) ดีสุดที่ 0.0077 W/mK

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ฟิล์มนิกเกิลนาโนเชน-อะลูมินา (Ni nanochain- Al_2O_3) ที่อัตราส่วน 8 แม้จะให้ค่าการดูดกลืนแสงสูงแต่ยังพบว่าค่าการแผ่รังสีความร้อน (Thermal emittance) ของฟิล์มก็สูงเช่นกัน หากทำการปรับสัดส่วนระหว่างนิกเกิลกับอะลูมินาหรือเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายอะลูมินาอาจช่วยให้ค่าการแผ่รังสีความร้อนของฟิล์มลดลง เนื่องจากอะลูมินาเป็นวัสดุประเภทเซรามิกซึ่งมีคุณสมบัติเป็นฉนวนความร้อนส่งผลให้ฟิล์มเกิดการสูญเสียความร้อนให้สิ่งแวดล้อมน้อยลง ค่าการแผ่รังสีความร้อนก็จะลดลง
2. ปริมาณของนิกเกิลในอะลูมินาที่เพิ่มขึ้นช่วยให้ฟิล์มมีค่าการดูดกลืนแสงที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด แต่ในงานวิจัยนี้พบข้อจำกัดเรื่องการละลายของนิกเกิลในสารละลายอะลูมินา หากใส่สารที่ช่วยลดแรงตึงผิวอาจทำให้นิกเกิลสามารถละลายในอะลูมินาได้ดีขึ้น

ภาคผนวก ก

ภาคผนวก ก ตารางแสดงเส้นผ่านศูนย์กลาง และความยาวของอนุภาคนาโนนิกเกิล

วัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง และความยาวของอนุภาคนาโนนิกเกิลจากภาพ SEM จำนวน 20 จุดโดยใช้โปรแกรม ImageJ

ตารางที่ 6 ตารางแสดงเส้นผ่านศูนย์กลาง และความยาวของอนุภาคนาโนนิกเกิล ที่อัตราส่วน

$[\text{NaOH}]/[\text{NiCl}_2] = 8$

$[\text{NaOH}]/[\text{NiCl}_2] = 8$	Diameter	Length
1	0.334	4.354
2	0.314	1.436
3	0.391	2.934
4	0.195	3.043
5	0.222	2.193
6	0.331	2.113
7	0.239	2.534
8	0.248	1.131
9	0.343	1.187
10	0.317	0.687
11	0.243	2.713
12	0.288	2.126
13	0.321	2.408
14	0.486	2.618
15	0.236	2.188
16	0.257	2.533
17	0.238	2.455
18	0.263	2.475
19	0.181	2.077
20	0.238	2.158
Average	0.28425	2.26815
SD	0.072147	0.785139

ภาคผนวก ข

ภาคผนวก ข ตารางแสดงปริมาณอนุภาคนาโนนิกเกิลที่สังเคราะห์ได้ที่อัตราส่วนแตกต่างกัน

หาปริมาณอนุภาคนาโนนิกเกิลโดยสังเคราะห์อนุภาคนาโนนิกเกิลจากปฏิกิริยารีดักชัน และใช้อัตราส่วน $[\text{NaOH}]/[\text{NiCl}_2]$ ที่แตกต่างกัน จากนั้นชั่งน้ำหนักของอนุภาคนาโนนิกเกิล พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของ NaOH จะส่งผลให้ปริมาณของอนุภาคนาโนนิกเกิลที่สังเคราะห์ได้เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญแสดงดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ตารางแสดงปริมาณอนุภาคนาโนนิกเกิลที่สังเคราะห์ได้ที่อัตราส่วนแตกต่างกัน

$[\text{NaOH}]/[\text{NiCl}_2]$	ปริมาณอนุภาคนาโนนิกเกิลที่สังเคราะห์ได้ (กรัม)
4	0.35
8	0.49
20	0.51

ภาคผนวก ค

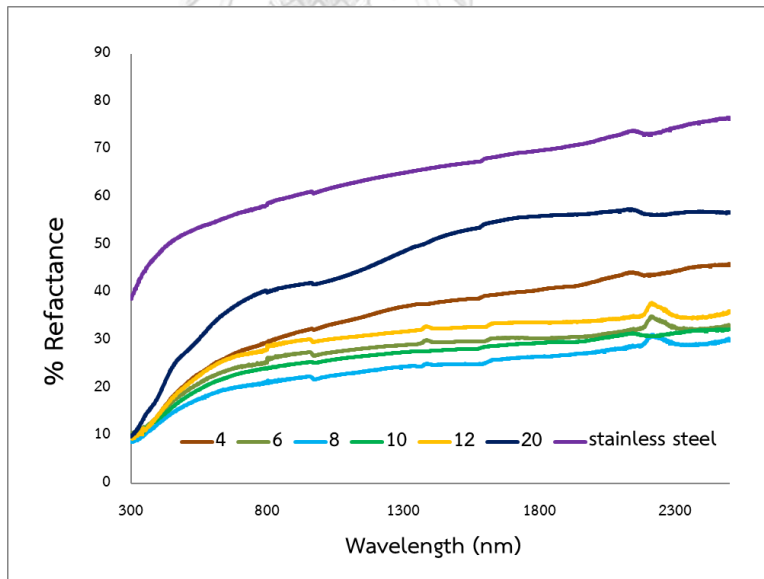
ภาคผนวก ก ผลการทดสอบค่าการดูดกลืนแสง (Solar absorptance) ของฟิล์มอนุภาคนาโนนิกเกิล-อะลูมินา

วิธีการคำนวณค่าการดูดกลืนแสงของฟิล์มอนุภาคนาโนนิกเกิล-อะลูมินา

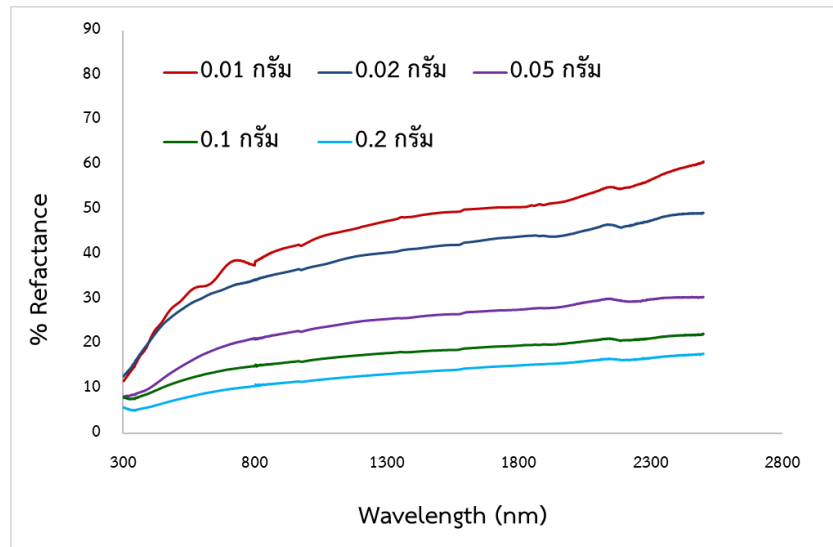
การคำนวณค่าการดูดกลืนแสงสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\alpha = \frac{\int_{0.3\mu\text{m}}^{2.5\mu\text{m}} I_{\text{sol}}(\lambda)(1 - R(\lambda))d\lambda}{\int_{3.0\mu\text{m}}^{2.5\mu\text{m}} I_{\text{sol}}(\lambda)d\lambda}$$

การดูดซับพลังงานแสงอาทิตย์ (α) คำนวณได้จากค่าการถ่วงน้ำหนักระหว่างการดูดกลืนรังสีและรังสีแสงอาทิตย์ที่แผ่เข้ามา (sol) สามารถคำนวณได้ตามข้างต้นซึ่ง ($R(\lambda)$) คือค่าการสะท้อนแสงของฟิล์มสามารถวัดได้จากเครื่อง UV-Vis spectroscopy นำค่า %R ที่ได้มาแทนลงสมการและใช้โปรแกรม Excel ในการคำนวณค่าการดูดกลืนแสง



รูปที่ 50 %การสะท้อนแสงของสแตนเลส และฟิล์มอนุภาคนาโนนิกเกิล-อะลูมินา ที่อัตราส่วน [NaOH]/[NiCl₂] ตั้งแต่ 4 - 20 โดยวัดจากเครื่อง UV-Vis spectroscopy



รูปที่ 51 การสะท้อนแสงของสแตนเลส และฟิล์มอนุภาคนาโนนิกเกิล-อะลูมินา โดยมีปริมาณอนุภาคนาโนนิกเกิลในอะลูมินาที่แตกต่างกัน โดยวัดจากเครื่อง UV-Vis spectroscopy

ภาคผนวก ง

ภาคผนวก ข ผลการทดสอบค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) ของฟิล์มอนุภาคนาโนนิกเกิล-อะลูมินา

วิธีการคำนวณค่าการนำความร้อนของฟิล์มนิกเกิลนาโนเซน-อะลูมินา (Ni nanochain- Al_2O_3)

ทำการวัดอุณหภูมิที่ด้านบน (วัดที่ฟิล์ม) และวัดอุณหภูมิด้านล่าง (วัดที่สแตนเลส) ตามลำดับ โดยใช้ Thermocouple วางไว้ด้านบนอีกอันวางด้านล่างและอ่านค่าจาก Thermometers มีหน่วยเป็นเคลวิน (K) โดยจะอ่านอุณหภูมิทุกๆ 1 นาทีเป็นเวลา 30 นาที และให้มีอุณหภูมิเริ่มต้น (เวลา=0) เท่ากับ $30^{\circ}C$ เสมอ จะได้ค่าดังตาราง และ T1, T3 ที่ใช้ในการคำนวณคืออุณหภูมิที่วัด ณ นาทีที่ 30 ซึ่งเป็นสภาวะที่ Steady-state

ตารางที่ 8 อุณหภูมิของฟิล์มนิกเกิลนาโนเซน-อะลูมินา T1, T3 ที่วัดทุกๆ 1 นาที ทั้งหมด 60 นาที

เวลา (นาที)	T1 ($^{\circ}C$)	T3 ($^{\circ}C$)
0	30.0	30.0
1	48.6	47.5
2	50.1	49.8
3	51.3	50.5
4	51.4	50.9
5	52.5	51.8
6	52.5	51.9
7	52.6	52.0
8	52.8	52.2
9	53.0	52.3
10	53.0	52.4
11	53.3	52.5
12	53.5	52.7
13	53.6	52.8
14	53.7	52.9
15	53.9	53.2

16	54.0	53.3
17	54.3	53.8
18	54.5	53.9
19	54.8	54.0
20	54.9	54.2
21	55.0	54.3
22	55.3	54.5
23	55.5	54.9
24	55.7	55.0
25	55.9	55.2
26	56.0	55.4
27	56.2	55.5
28	56.3	55.6
29	56.4	56.0
30	56.6	56.1

จากตารางเป็นการวัดอุณหภูมิตั้งแต่นาทีที่ 1 ถึง 30 ของฟิล์มอนุภาคนาโนนิกเกิล-อะลูมินา โดย นิกเกิลที่ใช้เป็นนิกเกิลที่ได้จากการสังเคราะห์ที่อัตราส่วน $[\text{NaOH}]/[\text{NiCl}_2]$ เท่ากับ 8 สามารถคำนวณ ค่าการนำความร้อนได้จากสมการ

$$k_f = \frac{q \cdot L_1}{A_1 \cdot [(T_1 - T_3) - \left(\frac{q \cdot L_2}{k_{ss} \cdot A_2}\right)]}$$

โดย q คือ พลังงานความร้อนที่ให้แก่ฟิล์มใช้เป็นหลอด Halogen (100 w, 230 v) โดยให้ความเข้มแสงเท่ากับ 1000 W/m^2

$$q = 1000 \times 0.645 \times 10^{-3}$$

$$q = 0.64516 \text{ W}$$

L_1 คือ ความหนาฟิล์มมีค่าเท่ากับ $2.718 \times 10^{-6} \text{ m}$

L_2 คือ ความหนาสแตนเลสมีค่าเท่ากับ $0.9 \times 10^{-3} \text{ m}$

A_1, A_2 คือ พื้นที่ผิวของฟิล์มและสแตนเลสมีค่าเท่ากับ $0.645 \times 10^{-3} \text{ m}^2$

T1 คือ อุณหภูมิด้านบน (วัดที่ผิวฟิล์ม) วัดที่นาฬิกาที่ 30 มีค่าเท่ากับ 329.75 K

T2 คือ อุณหภูมิด้านล่าง (วัดที่ผิวสแตนเลส) วัดที่นาฬิกาที่ 30 มีค่าเท่ากับ 329.25 K

K_{ss} คือ ค่าการนำความร้อนของแผ่นสแตนเลส W/m·K

$$k_f = \frac{0.64516 \cdot 2.718 \times 10^{-6}}{0.645 \times 10^{-3} \cdot [(329.75 - 329.25) - (\frac{0.64516 \cdot 0.9 \times 10^{-3}}{16.2 \cdot 0.645 \times 10^{-3}})]}$$

$$K_f = 0.0061 \text{ W/m}\cdot\text{K}$$



บรรณานุกรม

1. A.H. Elsheikh, S.W.S., Mohamed E. Mostafa, F.A. Essa, Mohamed Kamal Ahmed Alif *Applications of nanofluids in solar energy: A review of recent advances*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2018. **82**: p. 3483–3502.
2. Ke Zhang, L.H., Miao Du, Jing Mi, Ji-Ning Wang, Jian-ping Meng, *A review on thermal stability and high temperature induced ageing*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2017. **67**: p. 1282–1299
3. Amun Amri, Z.T.J., Trevor Pryor, Chun-Yang Yin, Sinisa Djordjevic, *Developments in the synthesis of flat plate solar selective absorber materials via sol–gel methods: A review* Renewable and Sustainable Energy Reviews 2014. **36**: p. 316–328.
4. H.L. Zhang, J.B., J. Degr eve, G. Caceres, *Concentrated solar power plants: Review and design methodology* Renewable and Sustainable Energy Reviews 2013. **22**: p. 466–481.
5. Bostrom T, W.E., Westin G, *Solution-chemical derived nickel– alumina coatings for thermal solar absorbers*. Solar Energy 2003. **74**: p. 497–503.
6. Duffie JA, B.W., *Solar engineering of thermal processes*. John Wiley & Sons Inc, 2006(4).
7. Kennedy, C.E., *Review of Mid- to High Temperature Solar Selective Absorber Materials* 2002 p. 1–58.
8. Cao, F., Kenneth McEnaney, Gang Chen, and Zhifeng Ren. , *A review of cermet-based spectrally selective solar absorbers*. Royal Society of Chemistry, 2017: p. 1–34.
9. Carol Atkinson, C.L.S., Heather J. Almond, Chris P. Shaw, *Coatings for concentrating solar systems – A review* Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015. **45**: p. 113–122.
10. T.Bostrom, *Solution-Chemically Derived Spectrally Selective Solar Absorbers*. Ph.D.Thesis from the Department of Materials Science at Uppsala University,Uppsala, 2006: p. 1–95.

11. T. Chonsut, A.R., S. Wirunchit, A. Kaewprajak, P. Kumnorkaew, N. Kayunkid, J. Nukeaw, *Rapid convective deposition; an alternative method to prepare organic thin film in scale of nanometer* Materials Today, 2017. **4**: p. 6134–6139.
12. Zhenxiang Li, J.Z., Lihui Ren, *Aqueous solution-chemical derived Ni–Al₂O₃ solar selective absorbing coatings*. Solar Energy Materials & Solar Cells 2012. **105**: p. 90-95.
13. Zhi Gang Wu, M.M., O. Montero, *The synthesis of nickel nanoparticles by hydrazine reduction* Advanced Powder Technology, 2010. **21**: p. 165–168.
14. Claudia Andreea Milea, E.I., Cristina Bogatu, Anca Duta, *Sol–gel Al₂O₃ powders—matrix in solar thermal absorbers*. J Sol-Gel Sci Technol 2013. **67**: p. 112–120
15. N.R. Nik Roselina, A.A., Koay Mei Hyie, Aidah Jumahat, M.A. Abu Bakar *Effect of pH on formation of Nickel Nanostructures through Chemical Reduction Method*. Procedia Engineering 2013. **68**: p. 43 – 48
16. Laura Esmeralda Garcia, M., *Concentrated Solar Power (CSP) in DESERTEC—Analysis of Technologies to Secure and Affordable Energy Supply*. Technology and Applications 2011. **1**: p. 15-17.
17. (IEA), I.E.A., *The Largest Solar Power Plants in the World - Technology Premiere in Europe*. . 2005: p. 1-3.
18. SOLAR, N., *Puerto Errado 2 in Spain*. 2015. **23**.
19. Team, P.-T., *Victorville Solar Power Generating Station, California, United States of America*. . 2015. **23**.
20. Sistemas, S.I.y., *First Commercial Moten Salt Central Reveiver Plant 17 MW, 15 hrs Storage, 6500 hrs/yr*. NREL CSP Technology Workshop, 2007.
21. C.Zou, W.X., L.Shao, *Functional multi-layer solar spectral selective absorbing coatings of AlCrSiN/AlCrSiON/AlCrO for high temperature applications*. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2016. **153**: p. 9-17.
22. G.Katumba, L.O., A.Forbesa, G.Makiwa, B.Mwakikungad, J.Lu, E.Wäckelgård, *Optical, thermal and structural characteristics of carbon nanoparticles embedded in ZnO and NiO as selective solar absorbers*. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2008. **92**(10): p. 1285-1292.

23. M.Klanjšek, G.K., Logar Z.Crnjak, Orel B.Orel, *Optimum thickness determination to maximise the spectral selectivity of black pigmented coatings for solar collectors*. Thin Solid Films, 1996. **227**(1-2): p. 185-191.
24. Bogner, M.D., *Thermal Conductivity Measurements of Thin Films using a Novel 3 Omega Method* Doctoral thesis, 2017.
25. T.S. Pan, Y.Z., J. Huang, B. Zeng, D.H. Hong, S.L. Wang, H.Z. Zeng, M. Gao, W. Huang, Y. Lin, *Enhanced thermal conductivity of polycrystalline aluminum nitride thin films by optimizing the interface structure*. Applied Physics 2012. **112**(4): p. 44905.
26. B.E. Belkerk, A.S., M. Carette, M.A. Djouadi, Y. Scudeller, *Structural dependent thermal conductivity of aluminium nitride produced by reactive direct current magnetron sputtering*. Applied Physics Letters 2012. **101**(15): p. 151908.
27. Dongliang Zhao, X.Q., Xiaokun Gu, Saad Ayub Jajja, Ronggui Yang, *Measurement Techniques for Thermal Conductivity and Interfacial Thermal Conductance of Bulk and Thin Film* Electronic Packaging 2016. **138**(4).
28. CG., G., *Solar Energy Materials*. Advanced Materials, 2003. **15**: p. 1789-803.
29. Lampert, C.M., *Coatings for enhanced photothermal energy collection. I: Selective absorbers*, . Solar Energy Materials & Solar Cells, 1979. **1**(5-6): p. 319-341.
30. R. B. Pettit, C.J.B., and C. S. Ashley, *Sol-gel double-layer antireflection coatings for silicon solar cells*. Solar Cells, 1985. **15**(3): p. 267-278.
31. A. F. Pereev and N. P. Frolova, *Antireflecting coatings for light-absorbing materials for the 0.4-5 μm spectral region*. Soviet journal of optical technology, 1974. **41**(8): p. 453.
32. Agnihotri OP, G.B., *Solar selective surfaces*. 1981.
33. Yang L, M.L., Chen T, Forsberg E, He S. , *A checkerboard selective absorber with excellent spectral selectivity* Applied Physics, 2015. **118**(18): p. 183103.
34. BS., R., *Comparison of TiO₂ and other dielectric coatings for buried π -contact solar cells: a review* Research and Applications, 2004. **12**(4): p. 253-81.
35. BO., S., *Chemical vapor deposition of thin semiconductor films for solar energy*

- conversion*. Thin Solid Films 1976;39:87–94., 1976. **39**: p. 87-94.
36. SBoT., A.G., 2014.
 37. Dan A, C.K., Barshilia HC, Basu B. Angular *solar absorptance and thermal stability of W/WAlN/WAlON/Al₂O₃-based solar selective absorber coating*. Applied Thermal Engineering, 2016. **109**(25): p. 997-1002.
 38. Dan A, C.K., Barshilia HC, Basu B. Colored., *selective absorber coating with excellent durability*. Thin Solid Films, 2016. **620**: p. 17-22.
 39. Dan A, J.J., Chattopadhyay K, Barshilia HC, Basu B. , *Spectrally selective absorber coating of WAlN/WAlON/Al₂O₃ for solar thermal applications*. . Solar Energy Materials and Solar Cells, 2016. **157**: p. 716-726.
 40. Konttinen P, L.P., Kilpi RJ. , *Mechanically manufactured selective solar absorber surfaces*. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2003. **79**(3): p. 273-283.
 41. Chen J, Y.H., Ae L, Tang Y, Kieven D, Rissom T, et al. , *Tapered aluminum-doped vertical zinc oxide nanorod arrays as light coupling layer for solar energy applications*. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2011. **95**(6): p. 1437-1440.
 42. Barnes WL, D.A., Ebbesen TW. , *Surface plasmon subwavelength optics*. Nature, 2003. **424**: p. 824-30.
 43. Zayats AV, S.I., Maradudin AA.. , *Nano-optics of surface plasmon polaritons*. Physics Reports, 2005. **408**(3-4): p. 131-314.
 44. Khan MR, W.X., Alam MA., *Fundamentals of PV efficiency limits for light absorption*. . 2012.
 45. P., B., *Long-range surface plasmon polaritons*. Advances in Optics and Photonics, 2009. **1**(3): p.:484–588. .
 46. Cespedes E, W.M., Sánchez-García JA, Alvarez-Fraga L, Escobar-Galindo R, Prieto C. *Sol Energy Mater Sol Cells* 2014;122:217–25. , *Novel Mo–Si₃N₄ based selective coating for high temperature concentrating solar power applications*. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2014. **122**: p. 217-225.
 47. Zhang Q-C, Y.Y., Mills DR., *High efficiency Mo-Al₂O₃ cermet selective surfaces for high-temperature application*. . Solar Energy Materials and Solar Cells, 1996. **40**(1): p. 43-53.
 48. Mcdonald, G.E., *A preliminary study of a solar selective coating system using a*

- black cobalt oxide for high temperature solar collectors*. Thin Solid Films, 1975. **72**(1): p. 83-88.
49. Harinipriya, B.U.a.S., *High-Temperature Solar Selective Coating*. Solar Energy Mat Solar, 2015. **81**: p. 181-188.
 50. Mills, Q.C.Z.a.D.R., *New cermet film structures with much improved selectivity for solar thermal applications*. Applied Physics Letters, 1992. **60**: p. 545-547.
 51. M. Okuyama, K.F.a.Y.H., *Ni cermet selective absorbers for solar photothermal conversion*. Solar Energy, 1979. **22**: p. 479-482.
 52. M. Farooq, A.A.G.a.M.G.H., *High performance sputtered Ni:SiO₂ composite solar absorber surfaces*. Solar Energy Materials and Solar Cells, 1998. **54**(1-4): p. 67-73.
 53. S. N. Kumar, L.K.M.a.K.L.C., *Nickel pigmented anodized aluminum as solar selective absorbers* Solar Energy Materials & Solar Cells, 1983. **7**: p. 439-452.
 54. T. S. Sathiaraj, R.T., H. Alsharbaty, M. Bhatnagar and O. P. Agnihotri, *Thin Solid Films*. 1990. **190**: p. 241-254.
 55. T. Boström, E.W.a.G.W., Sol Energ Mat Sol C, 2004, 84, 183-191. , *Anti-reflection coatings for solution-chemically derived nickel—alumina solar absorbers*. Solar energy materials and solar cells, 2004. **84**: p. 183-191.
 56. G. A. Niklasson and C. G. Granqvist, S.E.M., 1983, 7, 501-510. , *Solar absorptance and thermal emittance of coevaporated Co-Al₂O₃ cermet films*. Solar Energy Materials, 1983. **7**(4): p. 501-510.
 57. Tile, N., *Fabrication of high efficacy selective solar absorbers*. 2012: p. 1-91.
 58. JieXue, J., YuhuiDong, LeimengXuJianhai, LiHaiboZeng, *Nanowire-based transparent conductors for flexible electronics and optoelectronics*. Science Bulletin, 2017. **62**(2): p. 143-156.
 59. Nikita Kostylev, I.S.M., Adekunle O. Adeyeye, Sergey Samarin, Mikhail Kostylev *Plasmon-assisted high reflectivity and strong magneto-optical Kerr effect in permalloy gratings*. Applied Physics Letters, 2013. **102**.
 60. X. X. Wang, H.F.L., X. B. Yu, X. L. Shi and J. F. Liu, , *High-performance solution-processed plasmonic Ni nanochain-Al₂O₃ selective solar thermal absorbers*. Applied Physics Letters, 2012.
 61. Chen, S.-H.W.a.D.-H., *Synthesis and characterization of nickel nanoparticles by*

- hydrazine reduction in ethylene glycol*. Colloid and Interface 2003. **259**: p. 282–286.
62. James Townsend, R.B., Yuriy Galabura, Igor Luzinov, *Flexible Chains of Ferromagnetic Nanoparticles*. ACSNANO, 2014. **8**: p. 6970–6978
63. Chen-Min Liu, L.G., Rong-Ming Wang, Yuan Deng, Hui-Bin Xua and Shihe Yang, *Magnetic nanochains of metal formed by assembly of small nanoparticles*. Chem.Comm, 2004: p. 2726-2727.
64. Zengzilu Xia, W.W., *Synthesis of Nickel Nanowires with Tunable Characteristics*. Nanomaterials, 2016. **6**(19).
65. Craig Ungaro, A.S., Ivan Kravchenko, Dale K. Hensley, Stephen K. Gray, and Mool . Gupta *Optical and infrared properties of glancing angle deposited nanostructured tungsten films*. Department of Electrical & Computer Engineering, 2014.
66. Nilofar Asim, S.A., M. A. Alghoul, F. Y. Hammadi, Kasra Saeedfar, K. Sopian, *Research and Development Aspects on Chemical Preparation Techniques of Photoanodes for Dye Sensitized Solar Cells*. Photoenergy 2014.
67. J. Wang, L.Y.Z., P. Liu, T. M. Lan, J. Zhang, L. M. Wei, Eric Siu-Wai Kong, C. H. Jiang, Y. F. Zhang, *Preparation and growth mechanism of nickel nanowires under applied magnetic field* Nano-micro letters 2010. **2**: p. 134-138.
68. Xiaoyu Li, H.W., Kenan Xie, Qin Long, Xuefei Lai and Li Liao, *Self-assembly mechanism of Ni nanowires prepared with an external magnetic field* Beilstein J. Nanotechnol, 2015. **6**: p. 2123–2128.
69. Chao Chen, J.W., Zhimin Ren, Guodong Qian, Zhiyu Wang, *One-dimension TiO₂ Nanostructures: Oriented Attachment and Application in Dye-sensitized Solar Cell*. royal society of chemistry, 2014. **16**: p. 1681-1686.
70. L. Y. Zhang, J.W., L. M. Wei, P. Liu, H. Wei and Y. F. Zhang, *Synthesis of Ni nanowires via a hydrazine reduction route in aqueous ethanol solutions assisted by external magnetic fields* Nano-Micro Lett, 2009. **1**: p. 49-52.
71. Xian Jian, Z.Z., Sixin Wu, Lei Chen, Qing Zeng, Chao Wang, *Controllable preparation of Ni nanoparticles for catalysis of coiled carbon fibers growth*. Nanoscale Research Letter, 2014.

72. Jette, E.R.F., *Precision Determination of Lattice Constants*. J. Chem. Phys, 1935. **3**: p. 605–616.
73. Z. Li, J.Z.a.L.R., *Aqueous solution-chemical derived Ni-Al₂O₃ solar selective absorbing coatings*. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2012. **105**: p. 90-95.





จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ปิญาราชย์ ศรีมาลา
วัน เดือน ปี เกิด	6 ตุลาคม 2537
สถานที่เกิด	เชียงราย
วุฒิการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ที่อยู่ปัจจุบัน	245/296 หมู่1 ตำบลบางเสาธง อำเภอบางเสาธง จังหวัดสมุทรปราการ 10450
ผลงานตีพิมพ์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY